



**Maria de Fátima
Fonseca Domingues**

Monitorização de Estruturas Por Varrimento Laser



**Maria de Fátima
Fonseca Domingues**

Monitorização de Estruturas Por Varrimento Laser

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Física Aplicada, realizada sob a orientação científica do Doutor João de Lemos Pinto, Professor Catedrático do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e do Doutor Paulo Sérgio de Brito André, Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações e Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Doutor João de Lemos Pinto
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

vogais

Doutor José Maria Longras Figueiredo
Professor Auxiliar do Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade do Algarve

Doutor Paulo Sérgio de Brito André
Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Física da Universidade de Aveiro
Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações

Doutora Margarida Facão
Professora Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

agradecimentos

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação, contou com o apoio de muitas pessoas, pelo que quero expressar o meu sincero agradecimento a todos aqueles que me encorajaram e de alguma maneira contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Aos meus orientadores, pelo auxílio, pareceres e disponibilidade fornecidos.

À direcção da Igreja da Santa Casa da Misericórdia pela colaboração facilitada.

Aos amigos, por toda ajuda e presença constante.

À minha família, por todo o apoio incondicional.

A todos, o meu sincero agradecimento!

Fátima Domingues

palavras-chave

Sistemas de varrimento óptico, monitorização estrutural de edifícios históricos, reconstituição tridimensional de objectos.

resumo

Nos últimos anos, o estudo da evolução de deformações em edifícios históricos tem-se acentuado, com o objectivo de diagnosticar e programar planos de recuperação eficazes.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento e implementação de um sistema óptico para monitorização estrutural de edifícios históricos. O sistema tem por base a medição de distâncias obtida por diferença de fase de um feixe laser modulado. O varrimento ao longo da estrutura é realizado através de um espelho galvanométrico.

Com base neste princípio foi efectuado um estudo na Igreja da Santa Casa da Misericórdia de Aveiro.

A comparação de dados de sucessivos varrimentos, temporalmente espaçados, efectuados a um mesmo perfil permite visualizar o movimento estrutural de edifícios.

O sistema desenvolvido tem como objectivo facultar uma adequada monitorização da evolução de deformações em edifícios, com vista à implementação das melhores práticas de reabilitação do património histórico e cultural. Como vantagens adicionais, salientam-se a elevada sensibilidade, o carácter não destrutivo e a possibilidade de medida em tempo real.

keywords

Optical scanning systems, structural monitoring of cultural heritage, tridimensional reconstruction of objects.

abstract

In the last years, the study of deformation's evolution in historical buildings has been accentuated, with the aim to diagnosis and to program effective recovery plans.

This work presents the development and implementation of an optical system for structural monitoring in heritage buildings. The system is based in the measurement of distances obtained through the phase shift of a modulated laser beam. The laser beam is scanned along the structure by a galvanometric mirror.

Based in this principle it was planned a study in the Church of Santa Casa da Misericórdia de Aveiro.

The comparison of consecutive scanning data, time spaced, executed to the same profile, it allows visualizing the structural movement of buildings.

The aim of the developed system is to facilitate an adequate monitoring of the deformation's evolution in buildings, seeking the implementation of the best and adequated rehabilitation techniques for cultural heritage. As additional advantages, it can be enhanced its high sensitivity, non destructive character and the possibility of real time measurement.

Glossário de acrónimos

LRF	Laser Range Finder	Medidor Laser de Distância
CCD	Charge-Coupled Device	Dispositivo de Carga Acoplado
PDA	Personal Digital Assistant	Assistente Digital Pessoal
DAC	Digital to Analog Converter	Conversor Digital para Analógico

Lista de símbolos e constantes

c	Velocidade da luz no vazio
τ_D	Tempo de voo
f	Frequência do sinal modulado
$\Delta\varphi$	Diferença de fase entre sinal emitido e recebido
π	Valor numérico de pi
θ	Ângulo de rotação do espelho galvanométrico em função da tensão aplicada
V	Diferença de potencial aplicada (d.d.p.)
d	Distância adquirida pelo LRF
x	Abcissa das coordenadas cartesianas
y	Ordenada das coordenadas cartesianas
z	Cota das coordenadas cartesianas

Índice

O júri

Agradecimentos

Resumo

Abstract

Glossário de acrónimos

Lista de símbolos e constantes

Capítulo 1 – Introdução **1**

- 1.1. Enquadramento e motivação da tese* **1**
- 1.2. Estrutura da tese* **3**

Capítulo 2 – Monitorização óptica na conservação do património **5**

- 2.1. Introdução* **5**
- 2.2. Estado da Arte* **6**

Capítulo 3 – Desenvolvimento do sistema de varrimento baseado em LRF **11**

- 3.1. Introdução* **11**
- 3.2. Medidor laser de distâncias –Laser Range Finder (LRF)* **12**
 - 3.2.1. Triangulação* **12**
 - 3.2.2. Tempo de voo* **14**
 - 3.2.3. Diferença de fase* **14**
 - 3.2.4. Aquisição de distâncias no sistema de varrimento desenvolvido* **15**
- 3.3. Sistema de varrimento: espelho galvanométrico* **15**
- 3.4. Controlo do varrimento* **16**
- 3.5. Descrição experimental* **18**

Capítulo 4 – Varrimento laser para monitorização estrutural e reconstrução tridimensional **21**

- 4.1. Introdução* **21**
- 4.2. Determinação da relação entre ângulo de rotação e d.d.p. aplicada* **22**
- 4.3. Monitorização de estruturas* **24**
- 4.4. Monitorização estrutural do Arco Cruzeiro da Igreja da Misericórdia de Aveiro* **28**
- 4.5. Reconstrução tridimensional de objectos* **33**

Capítulo 5 – Conclusões e trabalho futuro **41**

- 5.1. Conclusão* **41**
- 5.2. Trabalho futuro* **43**

Referências bibliográficas **45**

Comunicações e publicações resultantes do trabalho efectuado **47**

Capítulo 1

Introdução

1.1. Enquadramento e motivação da tese

Actualmente, o património arquitectónico é visto como um marco da diversidade cultural deixado pelos nossos antepassados, o qual deve ser assegurado às gerações futuras. Para que este bem histórico lhes seja entregue no melhor estado de conservação possível, é necessário que a geração actual cuide da sua manutenção e preservação.

Uma vez que a deterioração é intrínseca à vida (a vida média prevista de um edifício contemporâneo é de cinquenta anos), este acto de preservação cultural pressupõe um grande esforço e dedicação a nível técnico e científico. Como tal, têm sido desenvolvidos e adquiridos nos últimos anos valiosas experiências e conhecimentos no campo da conservação e do restauro. Nomeadamente, no que se refere ao desenvolvimento de testes não destrutivos, de técnicas nas áreas de inspecção, monitorização e de análise

estrutural de edifícios históricos, com o objectivo de estabelecer diagnósticos correctos e programar planos de recuperação eficazes [1].

O movimento estrutural de edifícios, em especial nos mais antigos, está fortemente ligado ao seu estado geral de conservação. Assim, a análise estrutural é um método de significativa importância para avaliar o estado de conservação e para definir a melhor solução para o processo de restauro e de recuperação.

Num processo de avaliação estrutural, visando a caracterização e a redução da vulnerabilidade aos movimentos estruturais, é indispensável a aquisição da informação relevante e pertinente, tal como a referente às deformações estruturais. Esta permite uma melhor compreensão do comportamento da estrutura e o consequente desenvolvimento dos melhores e mais adequados métodos de protecção.

Visando a análise da tendência do movimento estrutural em edifícios históricos, foi elaborado um estudo relativo à implementação de um sistema de monitorização, utilizando um medidor laser de distâncias “Laser Range Finder” (LRF) e um sistema de varrimento composto por espelhos galvanométricos controlados por um computador. O LRF foi escolhido por se basear num método de elevada precisão sem a necessidade de contacto físico com a estrutura.

A utilização de uma monitorização não destrutiva para análise de movimentos estruturais em edifícios históricos permite supervisionar a estrutura e a sua evolução ao longo do tempo, sem interagir fisicamente com a mesma. Considera-se portanto, que a implementação deste sistema de varrimento é uma mais-valia, uma vez que, contribui para a elaboração de um diagnóstico do estado de conservação sem o risco acrescido de danificar a estrutura em análise [2].

O contributo desta dissertação reporta-se ao estudo e implementação de um sistema de varrimento laser para monitorização estrutural visando a conservação do património cultural.

1.2. Estrutura da tese

Esta tese divide-se em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo faz-se um enquadramento da tese e da necessidade de realização do trabalho desenvolvido.

No capítulo dois pretende-se rever algum do trabalho já existente sobre monitorização e avaliação estrutural do património arquitectónico e cultural. São ainda expostos os sistemas desenvolvidos por alguns autores no âmbito da digitalização tridimensional de objectos.

No capítulo três será descrito o aparato experimental e serão enumeradas as funções e características de cada um dos aparelhos e programas empregues, assim como, o seu contributo sinérgico para o sistema de varrimento final.

No capítulo quatro serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no campo da análise estrutural de edifícios e no campo da reconstrução tridimensional de objectos.

O capítulo cinco pretende ser uma síntese do trabalho desenvolvido, no qual se focará o contributo dado pelo sistema de varrimento laser na análise estrutural e na reconstrução tridimensional de objectos. Será sugerido, ainda neste capítulo, o trabalho futuro a ser desenvolvido.

Capítulo 2

Monitorização óptica na conservação do património

2.1. Introdução

Este capítulo pretende apresentar uma revisão bibliográfica dos trabalhos científicos realizados na área da monitorização estrutural e da digitalização de objectos. Serão apresentadas as técnicas reportadas por diferentes autores, e analisadas as vantagens e lacunas inerentes às mesmas.

2.2. Estado da arte

As estruturas do património arquitectónico apresentam, pela sua natureza e História, um elevado desafio no campo da conservação, nomeadamente, a nível de análise, diagnóstico, monitorização e consolidação estrutural. Para vencer esse desafio, é indispensável combinar o conhecimento e a experiência científica e cultural no estudo exaustivo das melhores soluções a aplicar quer no âmbito da análise e diagnóstico, quer no âmbito da intervenção e conservação [3].

Nas secções seguintes serão descritos alguns dos avanços científicos e tecnológicos que facultam meios de análise e diagnóstico adequados para a implementação de processos de preservação do património arquitectónico. Esta análise será centrada no campo da monitorização óptica de estruturas e também nas técnicas decorrentes para digitalização de objectos.

A melhoria e implementação de métodos não destrutivos, ou pouco destrutivos, para a análise, diagnóstico e prevenção precoce de danos no património cultural, deve merecer toda a atenção da comunidade responsável pelo restauro e conservação do património [4].

Actualmente os métodos mecânicos mais utilizados na fase de diagnóstico, para a detecção de propriedades físicas em estruturas de património cultural, são em geral iguais aos utilizados frequentemente em edifícios civis. Nomeadamente, no que se refere a testes de resistência à compressão, à dureza de superfície, tracção e flexão [5]. No entanto, apesar da utilidade inerente a cada uma das técnicas mencionadas, estas são consideradas técnicas destrutivas ou ligeiramente destrutivas para a estrutura em análise.

Mais recentemente tem sido aprofundada a monitorização de estruturas através de sensores de fibra óptica baseados em redes de Bragg. Neste campo, os autores *Lima et al* apresentam o desenvolvimento e implementação de um sistema de monitorização estrutural baseado em sensores de Bragg em fibra óptica, com capacidade para monitorizar deformações à escala micrométrica. O sistema implementado por estes autores é composto por 19 sensores de deslocamento e 5 sensores de temperatura, colocados sobre as principais fendas detectadas numa avaliação estrutural inicial do Arco Cruzeiro da Igreja da Santa Casa da Misericórdia de Aveiro [6]. Apesar da sensibilidade demonstrada por este

sistema ser uma mais-valia para a avaliação estrutural, a sua implementação isolada pode revelar-se insuficiente para um estudo mais rigoroso do comportamento estrutural. Essa insuficiência deve-se ao facto da sensibilidade se limitar a movimentos de reduzidas dimensões.

Os métodos não destrutivos para monitorização estrutural, actualmente mais difundidos são baseados em ultra-som, radar e termografia [4]. No entanto, tem-se verificado também o desenvolvimento e implementação de sistemas de varrimento laser como métodos não destrutivos para a monitorização estrutural.

Park et al descrevem um sistema de monitorização, baseado no varrimento de laser terrestre, para fazer a aquisição de distâncias a vários pontos da estrutura em análise. O deslocamento ou deformação da estrutura é determinado após novo varrimento da estrutura, através da comparação com os dados obtidos no primeiro varrimento. Segundo estes autores, em comparação com outros métodos de monitorização, nomeadamente sistemas de fibra óptica e extensómetros eléctricos, este sistema de varrimento revelou um erro de 1,6% relativamente à medição directa, enquanto os restantes apresentaram diferenças de respectivamente 0,7-10,0% e 6,1-10,0%. O sistema laser utilizado por estes autores para aquisição de distâncias baseia o seu princípio de funcionamento no tempo de voo do sinal associado ao feixe laser [7]. Este método de aquisição de distâncias, juntamente com os métodos por triangulação laser e diferença de fase, será aprofundado no capítulo três deste trabalho.

O varrimento laser tem sido amplamente utilizado ao longo dos anos para diferentes funções. Vários sistemas de varrimento têm sido desenvolvidos com o intuito de melhorar e facilitar a aquisição de dados no campo da digitalização de objectos (alguns destes com cariz histórico) e, consequente, reconstrução tridimensional.

Relativamente a esses desenvolvimentos pode salientar-se o trabalho desenvolvido por *Godin et al*, no qual são apresentados protótipos de sensores para reconstrução de modelos tridimensionais, em diferentes ambientes e condições. Os sensores desenvolvidos por este grupo têm configurações ópticas distintas, mas baseiam-se ambos no princípio de triangulação laser. Com uma das configurações descritas é possível efectuar a aquisição de todo o perfil do objecto em análise, simultaneamente. Nesse trabalho, é ainda referida a importância da digitalização tridimensional de artefactos históricos, quer para o campo da

conservação e restauro, quer na sua divulgação em museus virtuais. Como exemplo de trabalho desenvolvido é de referir a digitalização de um fóssil com 113,0 mm de comprimento com uma resolução de 0,1 mm [8].

Com a utilização de um sistema de varrimento, baseado num laser policromático para medição da cor, estes autores descrevem a elaboração de modelos digitais de objectos com uma resolução em profundidade de 0,01 mm [8]. Apesar do amplo campo de aplicação apresentado (relevos de pinturas, esculturas, jazidas arqueológicas) e da resolução apresentada pelos sistemas implementados, estes têm a sua lacuna nas distâncias para as quais podem actuar, uma vez que tem um campo de acção entre 0,5 m e 10,0 m [8].

Os autores *Winkelbach et al* apresentam um método de digitalização de objectos com base na triangulação laser. Esta proposta centra-se num sistema de baixo custo, para aquisição de dados a três dimensões. Os seus principais componentes são um laser comercial (com comprimento de onda de 630 nm), um sistema de lentes cilíndricas (para dispersão do feixe laser ao longo de uma linha) e uma *webcam* (para captação do sinal reflectido pelo feixe). Neste sistema a resolução no varrimento depende directamente da calibração da *webcam* e do ângulo de calibração. A distância do objecto à câmara é também um factor relevante para a resolução no varrimento [9].

Estes autores efectuaram o varrimento de uma superfície de dois planos paralelos com desnível de 50,25 mm entre si, um ângulo de varrimento de 30-35° e uma distância de 600 mm entre o objecto e a câmara obtendo um erro de 0,37 mm. No entanto, a velocidade de varrimento não pode ser muito elevada, para que o registo da intercepção do laser com a imagem possa ser devidamente efectuado [9]. Embora o sistema descrito seja de fácil implementação, tem como contrapartida a necessidade de calibração e a obrigatoriedade de funcionamento num ambiente escuro. Apesar da precisão dos resultados apresentados, o tempo de todo o processo de recolha de dados para conseguir atingir essa perfeição é bastante elevado.

De referir que na bibliografia sobre este tópico, é possível encontrar diversos sistemas de varrimento laser para monitorização ou digitalização de artefactos históricos e objectos, mas, à excepção do sistema apresentado por *Park et al* para monitorização estrutural, todos os restantes se baseiam no processo de aquisição de distâncias por triangulação laser. A utilização de medidores de distância por diferença de fase ou tempo

de voo não têm sido explorados nesse campo. A vantagem relativa à utilização destes sistemas recai na capacidade dos mesmos em medirem distâncias relativamente elevadas (o medidor laser de distâncias por diferença de fase tem um alcance de até 200 m), o que torna possível a sua operação afastado da estrutura em análise.

O estudo apresentado nesta dissertação recairá essencialmente sobre a aplicação de um medidor laser de distâncias por diferença de fase, como parte integrante de um sistema de varrimento para monitorização estrutural de edifícios e digitalização de objectos.

Capítulo 3

Desenvolvimento do sistema de varrimento baseado em LRF

3.1. Introdução

Neste capítulo será dado particular ênfase ao sistema projectado e implementado, procedendo-se à descrição dos componentes que o integram.

Será efectuada uma revisão das diferentes técnicas de medição de distância laser, com base no seu princípio de funcionamento, nomeadamente, triangulação laser, tempo de voo e diferença de fase. O sistema de espelhos utilizado para o varrimento será também apresentado, assim como o *software* empregue para optimização do mesmo.

Por final, será efectuada uma descrição pormenorizada do funcionamento global do sistema de varrimento laser.

3.2. Medidor laser de distâncias - Laser Range Finder (LRF)

Tendo por base o funcionamento de um medidor laser de distâncias, foi projectado um sistema de varrimento para monitorização de estruturas. O medidor laser de distâncias pode ter diferentes formas de funcionamento, no entanto, o seu princípio base centra-se na emissão de um determinado sinal óptico para um objecto e na posterior análise do sinal reflectido. O processo envolvido na emissão, recepção e análise desse sinal é característico de cada tipo de LRF (*laser range finder*), o que permite classificá-los como LRF por tempo de voo, por triangulação ou por diferença de fase [10].

Nas seguintes secções será efectuada uma análise mais cuidada de cada um dos métodos mencionados.

3.2.1. Triangulação

Na medição de distâncias por triangulação laser, um feixe é projectado na superfície de um determinado objecto e a imagem do ponto de luz criado pelo feixe laser é visualizado numa câmara CCD (*Charge-Coupled Device*) [11] [12].

Quando o objecto se move, a posição do granitado laser na sua superfície é alterada. De acordo com essa alteração, também a sua posição na câmara CCD é alterada [12].

Na Figura 3.1 está representado esquematicamente o funcionamento de um medidor laser por triangulação.

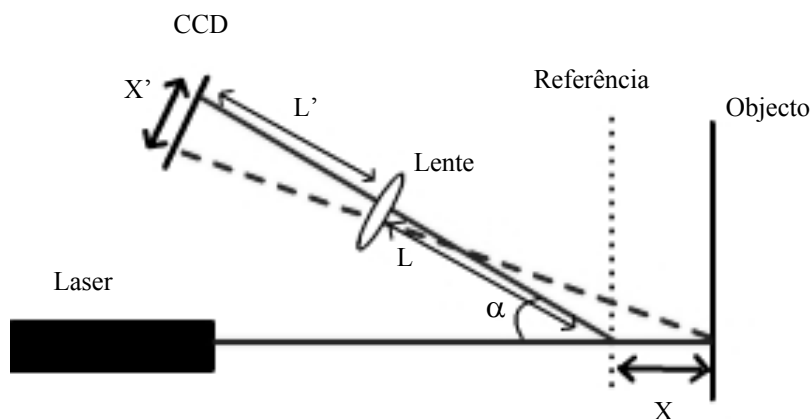


Figura 3.1 – Esquema de funcionamento da medição de distâncias por triangulação laser.

A relação entre a variação da posição do objecto e a variação da posição da imagem na câmara CCD é dada por:

$$X = (X' * L) / (L' * \sin \alpha - X' * \cos \alpha) \quad (3.1)$$

Onde X e X' representam o deslocamento real e o deslocamento da imagem na CCD respectivamente; L , L' e α são parâmetros estruturais, determinados por requerimentos específicos. Assim, através da medição de X' é possível determinar o deslocamento do objecto [12].

3.2.2. Tempo de voo

Na medição de distâncias por tempo de voo, um impulso óptico gerado num laser é projectado num determinado alvo, sendo medido o tempo que esse impulso leva para atingir o alvo, ser reflectido e voltar até ao detector [13].

A Figura 3.2 ilustra o princípio de funcionamento deste método de medição de distâncias.

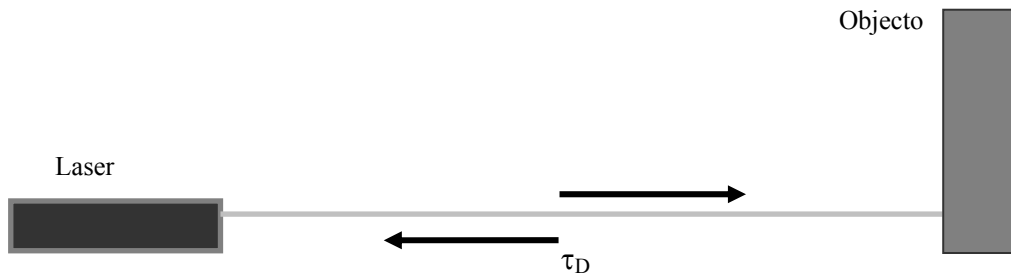


Figura 3.2- Esquema de funcionamento da medição de distâncias por tempo de voo.

Sendo D a distância do medidor ao alvo, τ_D o tempo de que o pulso leva para efectuar todo o percurso e c a velocidade da luz, então [10]:

$$D = ((c * \tau_D) / (2)) \quad (3.2)$$

A equação (3.2) traduz matematicamente o fenómeno anteriormente descrito, e permite determinar a distância existente entre o medidor e um determinado objecto/alvo.

3.2.3. Diferença de fase

Na medição de distâncias por diferença de fase, é emitido pelo laser um sinal óptico modulado com uma frequência f constante (sinal de referência). Após reflexão na superfície do alvo situado a uma distância D , o sinal é recebido por um fotodíodo com uma diferença de fase $\Delta\phi$. A Figura 3.3, ilustra o seu funcionamento [14] [11].

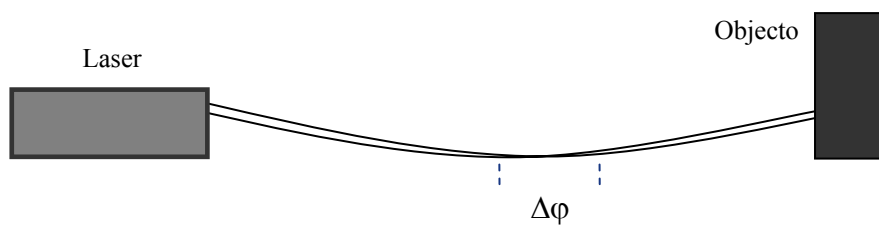


Figura 3.3- Esquema de funcionamento da medição de distâncias por diferença de fase.

A distância D a que se situa o alvo é determinada através da diferença de fase existente entre o sinal referência e o recebido no fotodíodo, dada pela seguinte relação:

$$2 * \pi * f = \Delta\phi / \tau_D \quad (3.3)$$

Sendo que o tempo de voo do sinal é dado por:

$$\tau_D = ((2 * D) / (c)) \quad (3.4)$$

Através da combinação das equações (3.3) e (3.4) obtém-se a relação existente entre a distância ao alvo e a diferença de fase entre o sinal emitido e o sinal reflectido [11]:

$$D = ((c * \Delta\phi) / (4 * \pi * f)) \quad (3.5)$$

A resolução no valor de distância medido através deste método depende directamente da precisão na medição do valor da diferença de fase [14].

Relativamente ao medidor laser de distâncias utilizado no decorrer deste trabalho, não é dada informação referente à frequência de modulação do sinal.

3.2.4 Aquisição de distâncias no sistema de varrimento desenvolvido

O sistema de varrimento laser desenvolvido utiliza para aquisição de distâncias o LRF por diferença de fase. O modelo utilizado, *Hilti PD 38*, permite para além da medição de distâncias, o cálculo de áreas, volumes, a adição e a subtracção de distâncias e o armazenamento de dados obtidos. Este armazenamento é possível devido ao *software* de interface que acompanha o aparelho e que permite a sua ligação *Bluetooth* com um PDA (*Personal Digital Assistant*). Relativamente ao alcance, este depende directamente da reflectividade e do tipo da superfície do alvo, sendo que, as medições efectuadas a superfícies reflectoras, tais como superfícies metalizadas, podem ser inexactas. No entanto, este aparelho permite adquirir distâncias em diversos alvos, tais como betão, pedra, madeira, plástico e papel, com um alcance de 0,05 m até 200 m. O alcance máximo depende da reflectividade da superfície alvo e também da luminosidade ambiente. A precisão é de $\pm 1,5$ mm, sendo que a menor unidade disponibilizada pelo aparelho é 1 mm. Este LRF permite adquirir distâncias e disponibilizá-las no visor com uma taxa de amostra superior uma amostra/segunda.

O laser emite um feixe visível de comprimento de onda compreendido entre 620 e 690 nm, com uma potência óptica de saída inferior a 1 mW. O diâmetro do feixe emitido é de 6 mm a uma distância até 10 m, aumentando até 30 mm a uma distância até 50 m e 60 mm a uma distância até 100 m.

3.3. Sistema de varrimento: espelho galvanométrico

O sistema de varrimento responsável pela projecção do feixe proveniente do LRF ao longo da estrutura, ou do objecto em análise, é composto por um espelho galvanométrico, tal como se apresenta na Figura 3.4. Este permite ângulos de varrimento compreendidos entre 0 e 180°, e as suas dimensões são de 12 mm de comprimento por 5 mm de largura, o que limita o diâmetro do feixe laser utilizado a dimensões inferiores a

estas. A reflectividade do espelho é superior a 95% para os comprimentos de onda compreendidos entre 400 e 700 nm, e a sua rotação é proporcional à diferença de potencial (d.d.p) aplicada, devendo esta ter um valor máximo de 20 V.

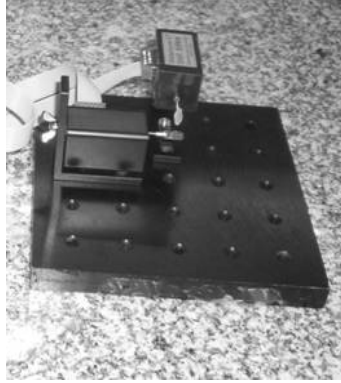


Figura 3.4 – Espelho galvanométrico utilizado para o sistema de varrimento.

Para conseguir um varrimento contínuo com frequência constante, será aplicado aos terminais do espelho um sinal eléctrico com forma triangular e uma amplitude de 2,5 V. A opção por um sinal de forma triangular foi efectuada para que a variação angular correspondente fosse o mais linear possível. A restrição da amplitude do sinal aplicado (2,5 V) está directamente relacionada com o facto de o gerador de sinal utilizado facultar uma diferença de potencial máxima de 5 V.

3.4. Controlo do varrimento

Para automatizar o sistema de varrimento e conjugar as suas diferentes funcionalidades, foi necessário utilizar diferentes programas computacionais de interface. Estes programas permitem aplicar o sinal eléctrico ao espelho, controlar o LRF e repetir a aquisição de distâncias sistematicamente.

A rotação do espelho é activada através de uma função gerada em *LabView*, o que permite o controlo da d.d.p. aplicada, assim como da sua frequência. Para que se efectue ligação entre o espelho e o computador é necessário usar um conversor digital para analógico, DAC (Digital to Analog Converter), que permite a interface entre o computador e o espelho. A DAC utilizada é o modelo *USB6008* da *National Instruments*. Através desta

é possível aplicar uma d.d.p. ao espelho e guardar os dados relativos ao sinal aplicado para posterior análise, nomeadamente, o valor de tensão aplicado em função do tempo.

Estes dados são armazenados com uma frequência de 3 amostras por segundo, no entanto, esta frequência é ajustável à velocidade de varrimento pretendida. Estes valores serão necessários, para o cálculo das coordenadas de cada ponto adquirido.

A plataforma de interface gerada e visível para o utilizador é a apresentada na Figura 3.5.

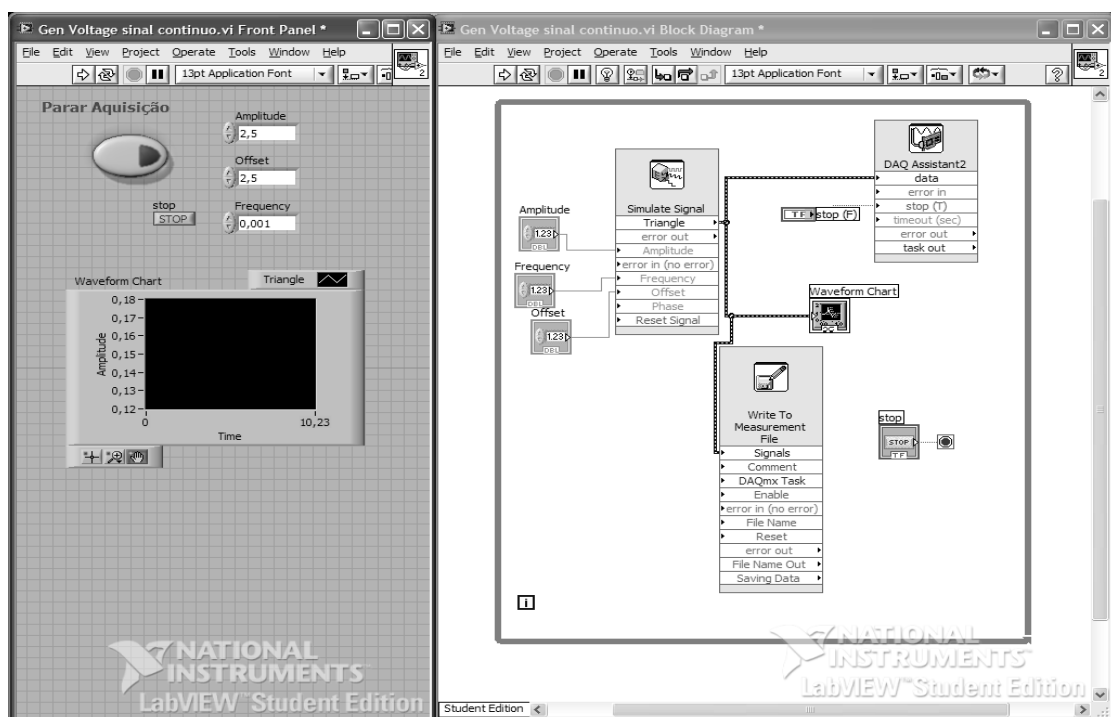


Figura 3.5 – Interface gerada em LabView para controlo da velocidade de rotação dos espelhos.

Para o controle do LRF através do computador, foi necessário implementar no sistema um programa para o controle do PDA e assim, consequentemente, obter o controlo do LRF. A aquisição de distâncias de forma sistemática e sucessiva, foi conseguida através inclusão de *software* gerador de *macros*, que permite efectuar a mesma tarefa (computacionalmente) de forma repetitiva e sincronizada.

3.5. Descrição experimental

No sistema de varrimento projectado, um feixe laser é direccionado através do espelho rotativo para a estrutura/objecto que se pretende analisar. A rotação do espelho, responsável pelo varrimento da estrutura, é controlada através da aplicação de um sinal triangular gerado computacionalmente e transmitido ao espelho através da DAC e da plataforma de interface do respectivo espelho, como representado esquematicamente na Figura 3.6. Assim, através do controle da rotação do espelho, é também possível controlar a direcção do feixe na estrutura. Como o controle do LRF se pode processar através do PDA por ligação *Bluetooth* e para que a aquisição de distâncias se processasse de modo contínuo e sistemático, sincronizado com o sistema de varrimento, foi necessário promover a ligação e consequente controlo do PDA através do computador utilizando o *software* adequado, já mencionado anteriormente. Na Figura 3.6, está representado esquematicamente o sistema experimental utilizado.

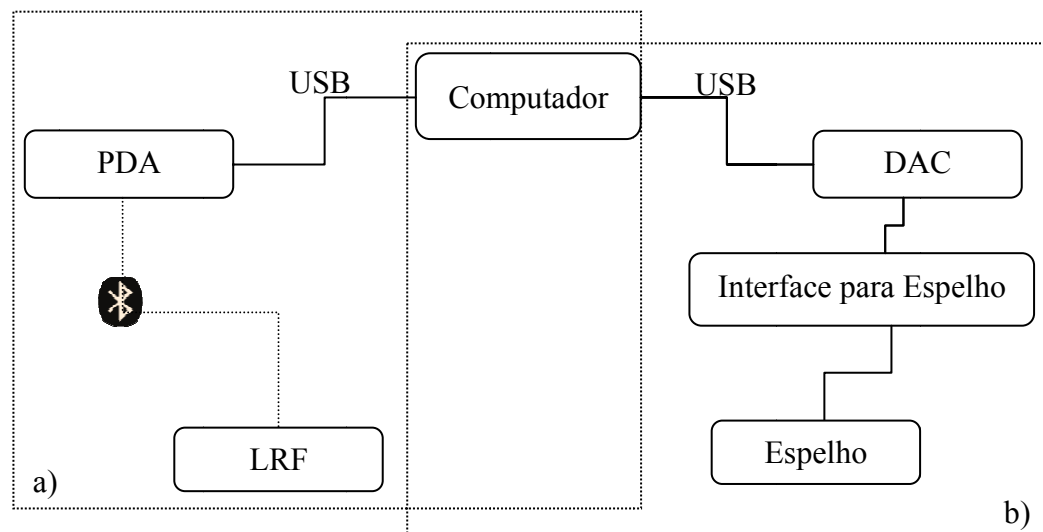


Figura 3.6 - Diagrama do sistema experimental utilizado: a) Sistema de aquisição de distâncias; b) Sistema de varrimento.

Em suma, através da ligação LRF/PDA/Computador, é efectuada a aquisição contínua e sincronizada do valor das distâncias do sistema de varrimento à estrutura. Através da ligação Espelho/Interface/DAC/Computador, é estabelecida a frequência e a direcção do varrimento.

Conjugando estes dois sistemas (aquisição de distâncias e varrimento), é possível adquirir sucessivos valores de distâncias, do espelho à estrutura em análise. Para que num varrimento seja adquirido o número máximo de pontos possível, é necessário que a velocidade de aquisição de distâncias esteja coordenada com a velocidade de varrimento. Esta é estabelecida pela velocidade de rotação do espelho, que é proporcional à frequência da d.d.p. que lhe é aplicada.

A partir da relação entre o valor de d.d.p. aplicada e o ângulo de rotação (determinada através da calibração inicial do sistema), é possível calcular o ângulo a que cada valor de distância é adquirido, desde que a razão entre a taxa de aquisição e a velocidade de varrimento seja devidamente controlada. Assim, os dados directamente recolhidos através do varrimento, distância ao ponto e respectivo ângulo, correspondem às coordenadas polares de cada ponto adquirido. Através dessas coordenadas, pode-se posteriormente calcular as coordenadas cartesianas de cada ponto adquirido, que quando representadas graficamente nos fornecem o perfil da estrutura analisada.

No capítulo seguinte serão apresentados e analisados os dados relativos a alguns dos varrimentos efectuados. Serão também documentadas algumas das dificuldades encontradas na implementação do sistema descrito.

Capítulo 4

Varrimento laser para monitorização estrutural e reconstrução tridimensional

4.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos na implementação do sistema de varrimento laser para monitorização estrutural e para a reconstrução tridimensional de objectos. Será descrita a metodologia utilizada para determinar as coordenadas de cada ponto adquirido no decorrer do varrimento e serão apresentados exemplos dos resultados obtidos com base nessa mesma metodologia.

4.2. Determinação da relação entre o ângulo de rotação e d.d.p. aplicada

Para otimizar o sistema de varrimento projectado, foi necessário encontrar a relação existente entre a d.d.p. aplicada ao espelho, através da DAC, e o ângulo de rotação induzido no espelho.

Para encontrar essa relação, foi aplicada ao espelho uma d.d.p. de valor conhecido e constante, ($V1$), e para essa d.d.p. foi adquirido o valor da distância do espelho a um determinado alvo ($d1$) situado a uma distância fixa do sistema de varrimento (d). A Figura 4.1 ilustra esquematicamente o procedimento efectuado.

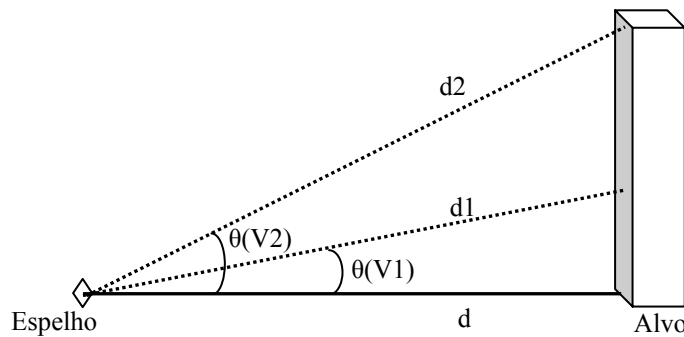


Figura 4.1- Esquema relativo ao procedimento experimental utilizado para calibração do sistema de varrimento.

A relação trigonométrica existente entre $d1$ e d é dada por:

$$\cos \theta = d/d1 \quad (4.1)$$

Conhecendo o valor da distância d e tendo em atenção a relação anterior (4.1) é possível calcular o ângulo θ existente entre $d1$ e d , que corresponde ao ângulo de rotação do espelho para uma d.d.p. aplicada de valor $V1$.

Este procedimento foi realizado para uma gama de d.d.p. entre 0,1 V e 5 V, com incrementos de 0,1 V. Para cada valor de d.d.p. aplicada efectuou-se o cálculo do ângulo de rotação correspondente.

Posteriormente procedeu-se à representação gráfica dos valores de ângulo obtidos em função da d.d.p. aplicada, $\theta(V)$, com o objectivo de encontrar a relação matemática existente entre os mesmos. A Figura 4.2 corresponde à representação dessa mesma relação.

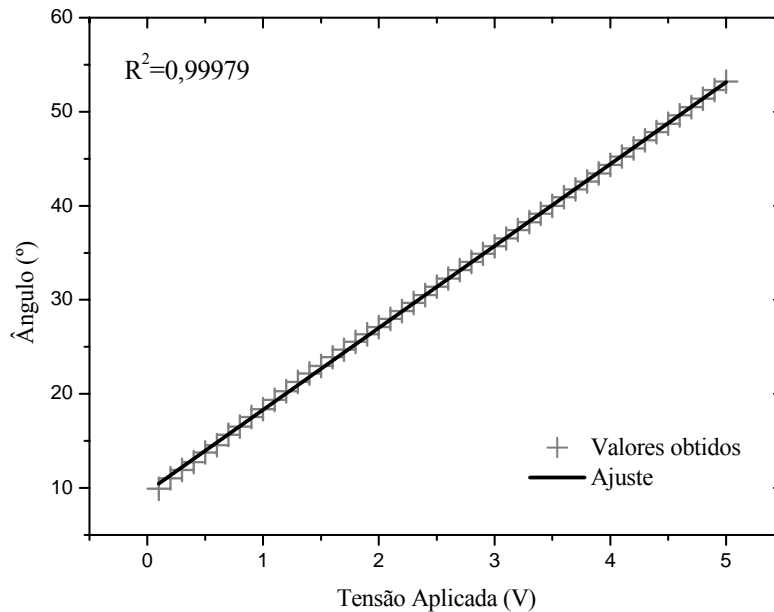


Figura 4.2 – Representação da relação existente entre d.d.p. aplicada e ângulo de rotação do espelho.

Como se pode verificar pela análise do gráfico, a relação existente entre a d.d.p. aplicada e o ângulo de rotação do espelho apresenta uma linearidade com um coeficiente de correlação de 0,99979. Com base nessa linearidade é possível estabelecer uma relação entre a d.d.p. aplicada e o ângulo de rotação, através da equação (4.2):

$$\theta = (8,710 \pm 0,018) * V + (9,596 \pm 0,053) \quad (4.2)$$

De referir que o valor de 9,596 da equação (4.2) corresponde ao valor do ângulo inicial do espelho com o eixo horizontal.

A equação (4.2) irá ser utilizada no cálculo das coordenadas cartesianas dos pontos adquiridos nos varrimentos efectuados posteriormente. É com base nesta relação que os valores de distâncias adquiridos serão convertidos em coordenadas polares e posteriormente em coordenadas cartesianas. Com os pontos finais conseguidos é possível efectuar a sua representação gráfica e deste modo obter um mapa da dispersão dos mesmos num sistema de eixos cartesiano. Este mapa corresponde ao perfil do elemento ao qual se efectuou o varrimento. Na secção seguinte serão apresentados alguns exemplos de varrimentos e representações efectuadas.

4.3. Monitorização de Estruturas

Para proceder à implementação do sistema de varrimento laser utilizando um LRF, para monitorização de estruturas, foi necessário sincronizar o sistema de varrimento (espelho galvanométrico) com o sistema de aquisição de distâncias (LRF), para que a relação descrita anteriormente (equação (4.2)) possa ser aplicada. Como foi descrito no capítulo 3, essa sincronização é conseguida conjugando diferentes aplicações computacionais que facultam simultaneamente, a aquisição de distâncias pelo LRF e a d.d.p. aplicada no espelho.

Os valores correspondentes às “distâncias medidas”, “tempo de aquisição” e “d.d.p” são fornecidos directamente pelo equipamento/*software* utilizado. O valor do ângulo é calculado através da equação (4.2). Com base nos valores de distâncias e respectivos ângulos obtidos, são calculados os valores x e y das coordenadas cartesianas, através da relação existente entre coordenadas polares e cartesianas, nomeadamente:

$$x = d * \cos \theta \quad (4.3)$$

$$y = d * \sin \theta \quad (4.4)$$

O valor de d corresponde à distância medida pelo LRF para o ponto em análise e θ corresponde ao valor do ângulo calculado para essa mesma distância (equação 4.2).

Depois de sistematizado o sistema de aquisição de dados e estabelecido o método para a análise dos mesmos, torna-se necessário verificar a sua viabilidade na monitorização estrutural. Para tal, foi efectuado um estudo relativamente à reprodutibilidade dos valores adquiridos para uma mesma linha de perfil, mas em varrimentos diferentes.

Para esse efeito, foram realizados no mesmo dia e consecutivamente, uma série de nove varrimentos para uma mesma linha de perfil de uma parede. A frequência de varrimento utilizada foi de 0,001Hz e a taxa de aquisição foi de 0,5 pontos por segundo, sendo adquiridos um total de 250 pontos para cada perfil.

Na Figura 4.3 pode ver-se a fotografia do perfil da parede ao qual foi efectuado o varrimento.



Figura 4.3 – Esquema do perfil de varrimento.

Na Figura 4.4 estão representados graficamente os resultados obtidos, e mostrada a sobreposição de todos os varrimentos efectuados.

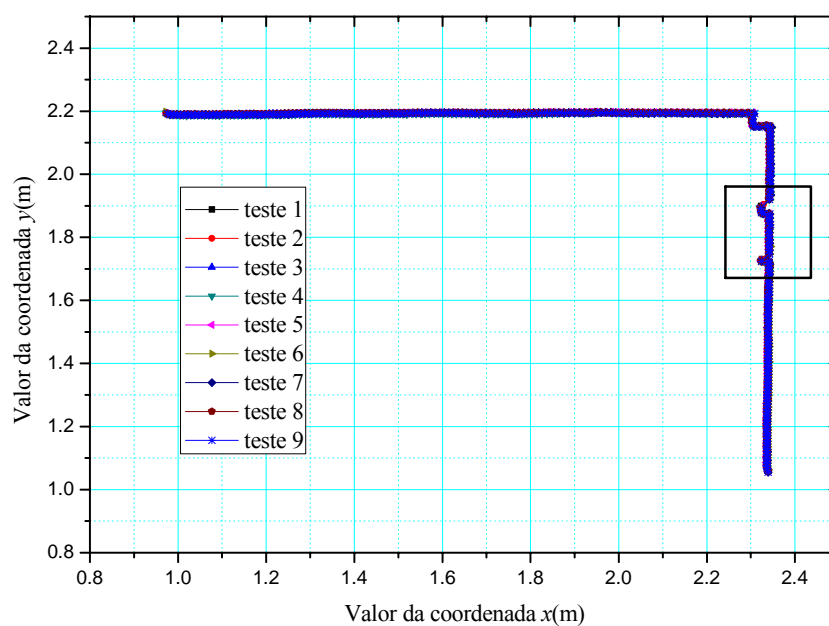


Figura 4.4 - Sobreposição de dados relativos a vários varrimentos efectuados ao mesmo perfil de uma parede.

Como se pode verificar pela sobreposição das várias linhas de perfil na Figura 4.4, os dados obtidos são coincidentes. Esta constatação pode revelar-se de extrema utilidade aquando da sua aplicação na monitorização de estruturas. Varrimentos efectuados a uma

mesma linha de perfil, com intervalos de tempo considerável (dias, semanas ou meses), permitem inferir o movimento efectuado pela estrutura caso as linhas para o mesmo perfil não sejam coincidentes.

Se analisarmos com maior detalhe parte dos dados representados na Figura 4.4, verifica-se que, apesar da aparente sobreposição, existem diferenças da ordem dos milímetros entre as diversas linhas de perfil adquiridas. Na Figura 4.5 é possível observar em pormenor a secção assinalada na Figura 4.4, na qual são visíveis as diferenças acima descritas.

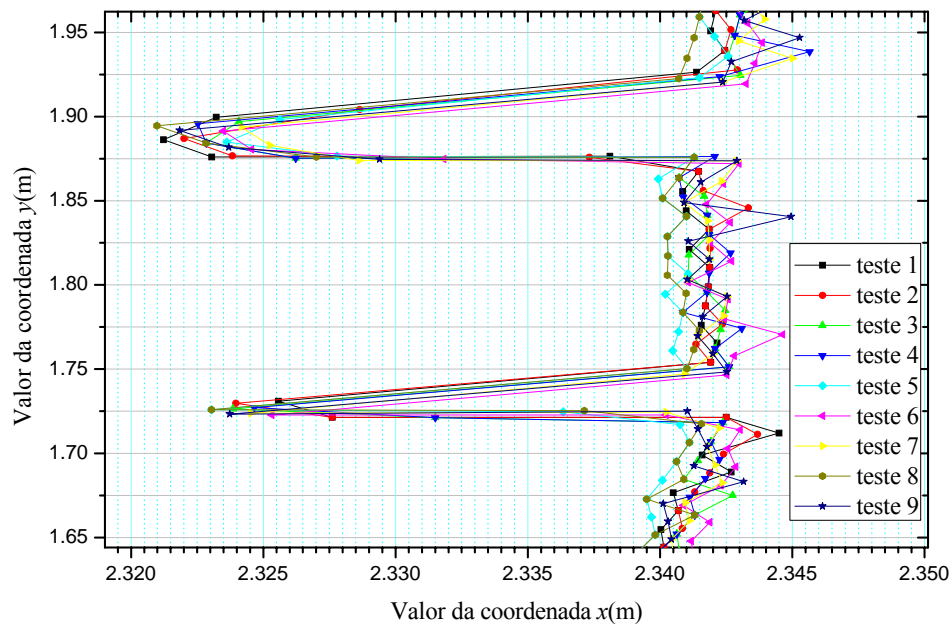


Figura 4.5 – Ampliação dos dados adquiridos para o mesmo perfil de uma parede.

Estas podem dever-se a erros experimentais inerentes ao sistema utilizado, nomeadamente, o erro associado à medição directa das distâncias (erro associado ao LRF (0,0015 m)) [15], o associado à aplicação da d.d.p. para o movimento do espelho (0,007 V) [16] e o erro associado à calibração do sistema (cálculo do valor do ângulo).

Tendo em atenção as equações utilizadas para o cálculo das coordenadas cartesianas verificamos que o erro respeitante ao cálculo das coordenadas anteriores é dado para a coordenada em x por:

$$\Delta x = \sqrt{(-d \sin \theta * \Delta \theta)^2 + (\cos \theta * \Delta d)^2} \quad (4.5)$$

E para a coordenada em y por :

$$\Delta y = \sqrt{(d \cos \theta * \Delta \theta)^2 + (\sin \theta * \Delta d)^2} \quad (4.6)$$

Com base nestas equações é possível calcular o erro associado a cada uma das medições efectuadas. Os valores máximos de erro obtidos são de 0,0012 m em x e 0,0013 m em y , considerando o erro em $\Delta \theta$ dado através da equação (4.2).

Para além do erro associado a cada medição individual, é também fundamental analisar o desvio médio existente entre os vários perfis adquiridos. Esta análise é necessária para que posteriormente seja possível distinguir os desvios de perfil, associados aos erros experimentais e inerentes ao sistema de varrimento, daqueles associados a deslocamentos estruturais.

Para encontrar o desvio médio entre as diferentes curvas de perfil obtidas, procedeu-se primeiro ao cálculo da curva média relativa aos vários testes encontrados, obtendo-se assim um perfil médio da estrutura. Em seguida efectuou-se o cálculo do desvio padrão das várias curvas de perfil em relação à curva de perfil médio. A Figura 4.6 corresponde à representação da curva de perfil médio obtida em conjunto com os perfis anteriormente descritos.

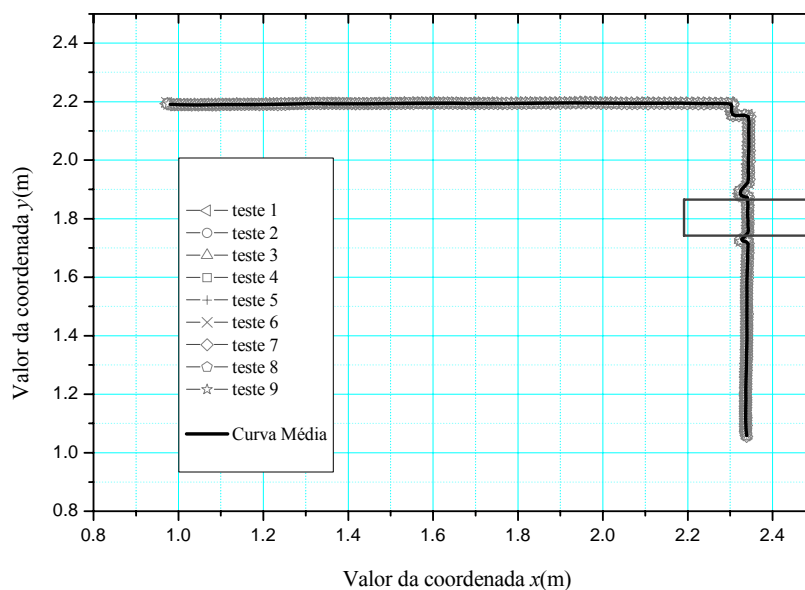


Figura 4.6 – Representação do perfil médio calculado relativamente aos valores adquiridos.

Na Figura 4.7 é possível visualizar em pormenor a secção assinalada na Figura 4.6, sendo visível a dispersão dos vários dados adquiridos em torno da curva média estipulada.

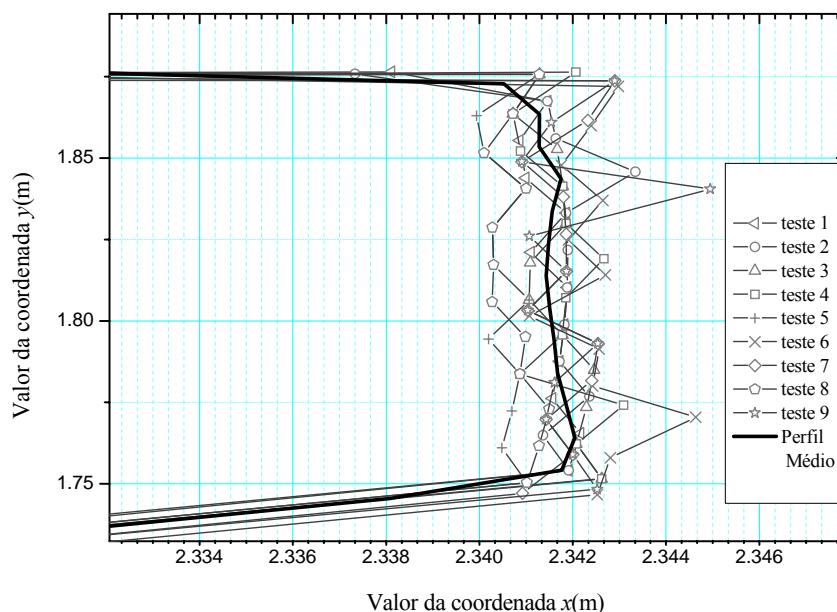


Figura 4.6 – Pormenor da representação do perfil médio, calculado relativamente aos valores adquiridos.

Analisando estatisticamente os valores obtidos, verifica-se que existe uma dispersão em torno do valor médio (desvio padrão) de 0,0021 m. Esta grandeza indica-nos que, deslocamentos de perfil detectados por este sistema e inferiores a este valor poderão estar relacionados com erros associados ao sistema de aquisição e não com movimentos estruturais. No entanto, desvios de valor superior aos assinalados poderão significar movimentos estruturais. Para que tais movimentos possam ser diagnosticados com um grau de confiança de 90%, e com base na distribuição *t-student*, os desvios às linhas de perfil iniciais deverão ser superiores a 0,0039 m.

4.4. Monitorização estrutural do Arco Cruzeiro da Igreja da Misericórdia de Aveiro

A Igreja da Santa Casa da misericórdia foi construída nos séculos XVI e XVII e é um importante marco do património arquitectónico e cultural da cidade de Aveiro. A sua

planta arquitectónica é composta por dois rectângulos nos quais se integram a nave central e a capela. Entre estas duas áreas e marcando a sua separação, erguem-se duas fileiras de pedras com a forma de um arco [6].

Pelo seu cariz histórico-cultural e visando a sua preservação estrutural, este edifício foi alvo de várias intervenções de consolidação e restauro ao longo dos séculos, sendo as últimas datadas de 1971 a 1975 e em 1977. Por ser um edifício com cinco séculos de idade, necessita de monitorização continuada, para que as anomalias que possam surgir sejam combatidas de modo a preservar a integridade estrutural do edifício. Como tal, é importante que sejam efectuadas análises frequentes a toda a estrutura [6].

No decorrer de uma análise efectuada foram detectadas algumas fissuras de dimensões razoáveis nesta estrutura histórica, nomeadamente no Arco Cruzeiro, o que promoveu a necessidade de avaliar e monitorizar a sua estabilidade estrutural.

Assim, ambicionando fornecer dados relevantes para a avaliação da estabilidade estrutural do Arco Cruzeiro da Igreja da Misericórdia em Aveiro, e com o intuito de efectuar uma avaliação inicial da implementação do sistema de varrimento em trabalho de campo, foram efectuados uma série de três varrimentos à mesma linha de perfil de um dos pilares do Arco Cruzeiro, como esquematizado na Figura 4.7.



Figura 4.7 – Pilar do Arco Cruzeiro da Igreja da Misericórdia de Aveiro no qual foi efectuado o estudo de perfil.

Pelo facto deste edifício ser aberto ao público, foram encontradas algumas dificuldades na implementação do sistema de varrimento. Entre elas, o habitual, embora não muito elevado fluxo de pessoas, acompanhado por constantes movimentos de portas da Igreja e consequentes correntes de ar geradas no interior do edifício. Estas perturbações adicionadas às próprias vibrações de todo o edifício, podem provocar variações na aquisição de distâncias, que não são directamente relacionáveis com o movimento estrutural associado ao seu estado de conservação.

Contudo, foram adquiridos um conjunto de dados relativos à linha de perfil da coluna do Arco Cruzeiro assinalada na Figura 4.7, com um erro médio, calculado através das equações (4.5) e (4.6), de 0,0015 m. A Figura 4.8a) corresponde à representação gráfica dos dados adquiridos e na Figura 4.8b) é possível visualizar em pormenor o perfil da coluna em análise.

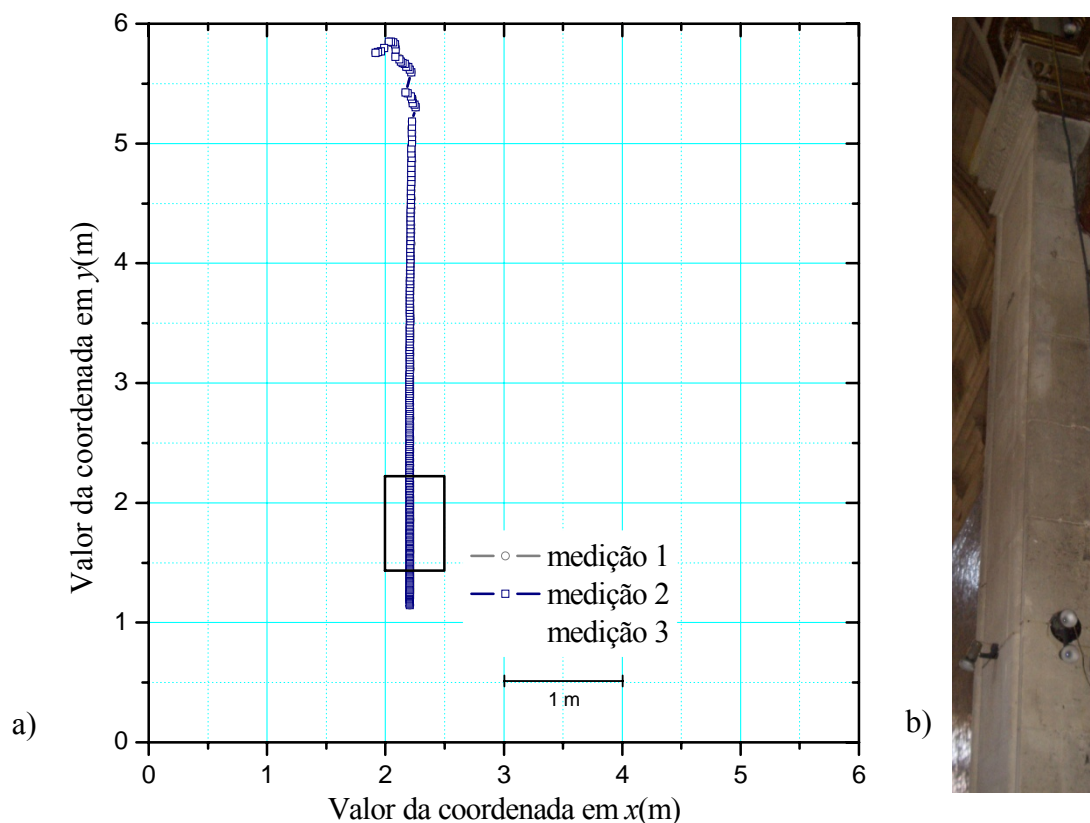


Figura 4.8 – a) Representação gráfica dos dados relativos ao perfil do pilar do Arco Cruzeiro da Igreja da Misericórdia de Aveiro; **b)** Fotografia da coluna do Arco Cruzeiro.

Pela análise da Figura 4.8 é possível verificar a sobreposição dos valores obtidos.

Na Figura 4.9 é possível observar em pormenor a secção assinalada na Figura 4.8, na qual é visível as diferenças existentes entre as três medições efectuadas. É também visível um aumento do afastamento entre as diferentes medições com o aumento em y (altura). Se analisarmos, por exemplo, os afastamentos existentes entre as medições 1 e 2, que apresentam maior diferença entre si, verificamos que para valores de y igual a 1,5 m existe um afastamento de 0,002 m e para y igual a 2,1 m o afastamento é de cerca de 0,003 m.

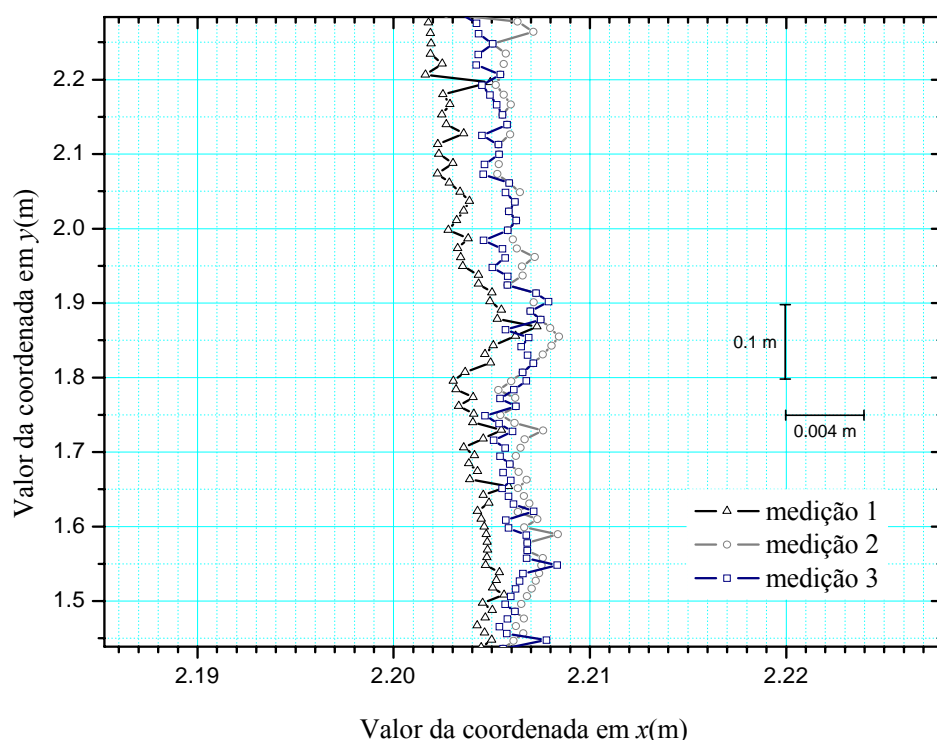


Figura 4.9 – Pormenor da representação gráfica dos dados relativos ao perfil da coluna do Arco Cruzeiro da Igreja da Misericórdia de Aveiro.

Esta diferença patente entre as três medições deve-se à influência de parâmetros exteriores ao sistema de varrimento, como os descritos anteriormente, assim como aos erros inerentes ao próprio sistema de varrimento.

Para quantificar o desvio existente entre os valores adquiridos, foi calculada uma curva média relativa às três medições efectuadas. A Figura 4.10 corresponde à representação gráfica da curva média encontrada e da sua posição em relação às linhas de perfil adquiridas.

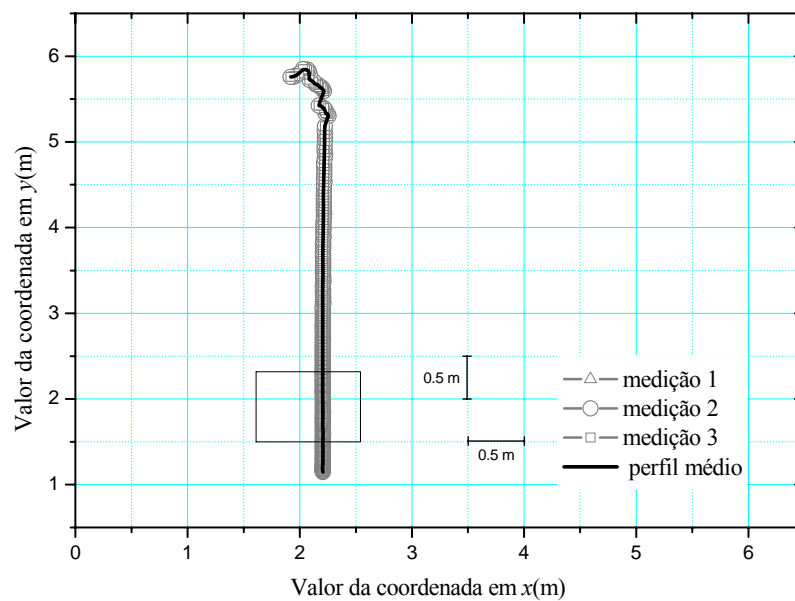


Figura 4.10 – Representação do perfil médio calculado relativamente às medições efectuadas.

A Figura 4.11 corresponde a uma ampliação da secção assinalada na Figura 4.10, na qual é visível a dispersão dos vários dados adquiridos em torno da curva média estipulada.

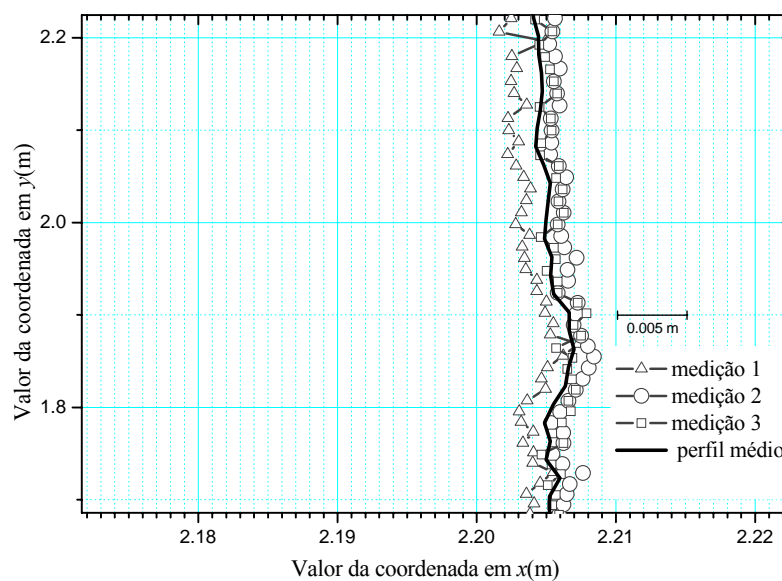


Figura 4.11 – Pormenor da representação do perfil médio calculado relativamente às medições efectuadas.

Analisando quantitativamente os valores obtidos, verifica-se que existe uma dispersão em torno do valor médio (desvio padrão) de 0,0018 m. Assim sendo, deslocamentos no Arco Cruzeiro com valores inferiores ou próximos a 0,0018 m, ainda que perceptíveis pelo sistema de varrimento, não poderão ser atribuídos a movimentos estruturais do edifício, pois poderão estar relacionados com erros inerentes ao sistema de aquisição ou à influência dos factores externos acima descritos, no sistema de varrimento.

Para que movimentos estruturais no Arco Cruzeiro possam ser diagnosticados com um grau de confiança de 90%, e com base na distribuição *t-student*, os desvios às linhas de perfil iniciais deverão ser superiores a 0,0052 m.

4.5. Reconstrução tridimensional de objectos

O sistema de varrimento projectado foi também testado na reconstrução tridimensional de objectos, na fase correspondente à aquisição de dados relativos ao relevo do objecto.

Nesta primeira fase foi utilizado como objecto de estudo, uma estátua com aproximadamente 0,06 m de largura e 0,10 m de altura. A Figura 4.12 corresponde à fotografia da estátua em análise, assim como ao sistema experimental utilizado.

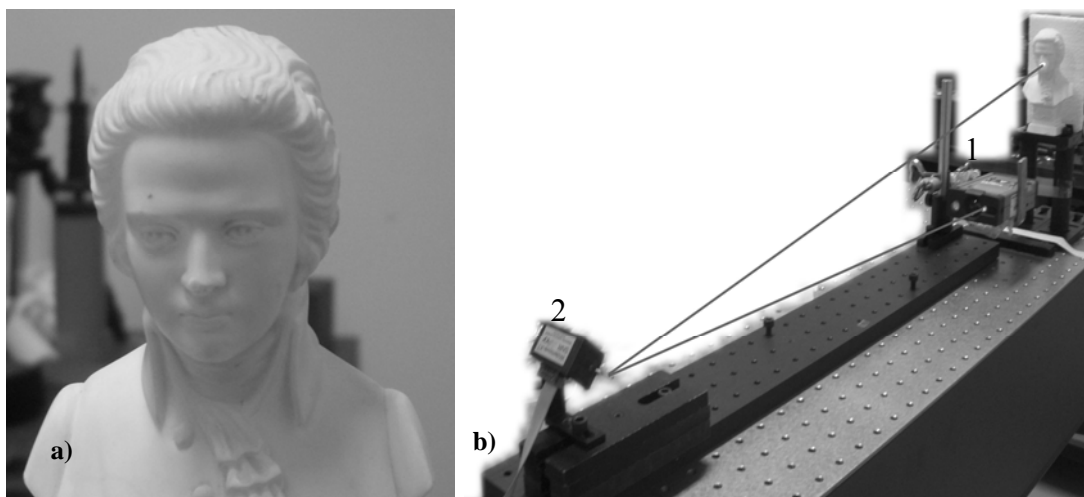


Figura 4.12 – a) Fracção da estátua à qual se efectuou varrimento; b) Sistema experimental: 1- Laser Range Finder (LRF); 2- Espelho galvanométrico;

Neste estudo foram adquiridos sucessivos perfis verticais da estátua com um espaçamento horizontal de 2 mm entre cada perfil adquirido. Para essa aquisição a estátua foi deslocada horizontalmente, numa linha perpendicular ao varrimento efectuado pelo espelho. Assim, para além das duas coordenadas x e y , obtidas através do varrimento, é possível associar uma terceira coordenada, z , correspondente ao movimento horizontal da estátua.

O varrimento foi efectuado com uma frequência de 0,001 Hz, e foram adquiridos 119 pontos em cada varrimento vertical, sendo 0,0005 m a distância média entre pontos adquiridos. Na Figura 4.13 a) estão representados graficamente os dados obtidos no varrimento para o perfil central da estátua, correspondente à Figura 4.13 b).

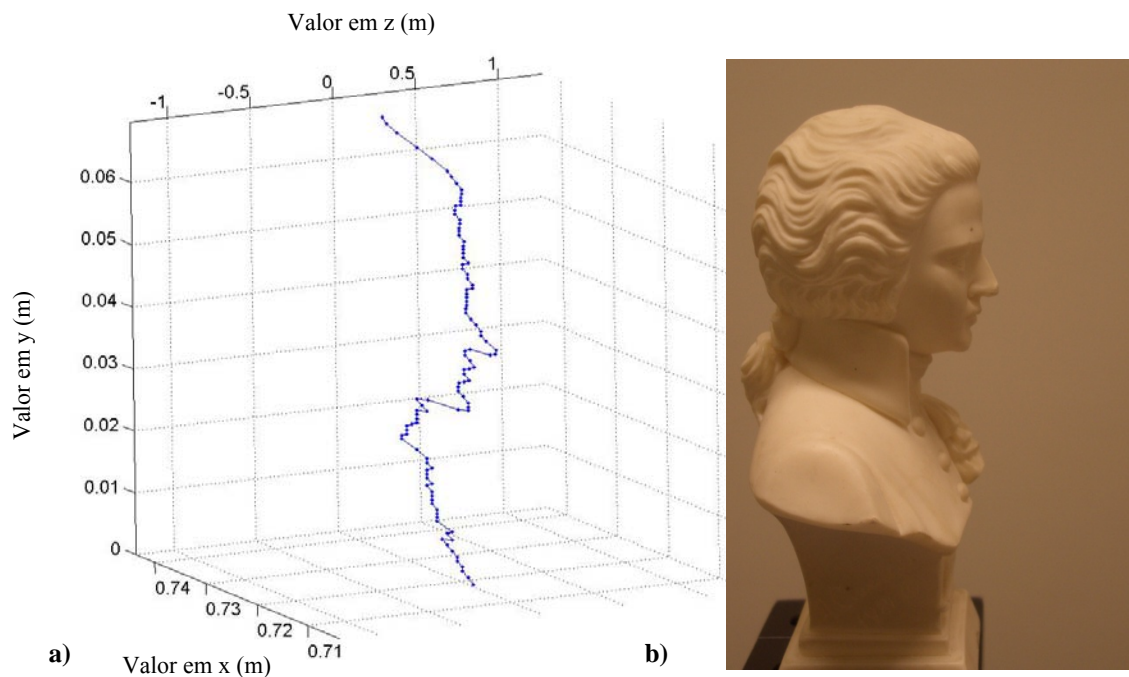


Figura 4.13 – a) Representação gráfica dos dados de varrimento referentes ao perfil de uma estátua; b) Perfil ao qual foi efectuado o varrimento.

Como se pode verificar pela análise da Figura 4.13, é possível reconstruir graficamente, através deste método, detalhes de relevo de uma estátua de dimensões relativamente pequenas.

Depois de efectuado o varrimento para os sucessivos perfis, obtém-se um conjunto de coordenadas tridimensionais, que depois de representado graficamente fornece um mapa da dispersão espacial dos pontos adquiridos. A Figura 4.14 ilustra essa representação.

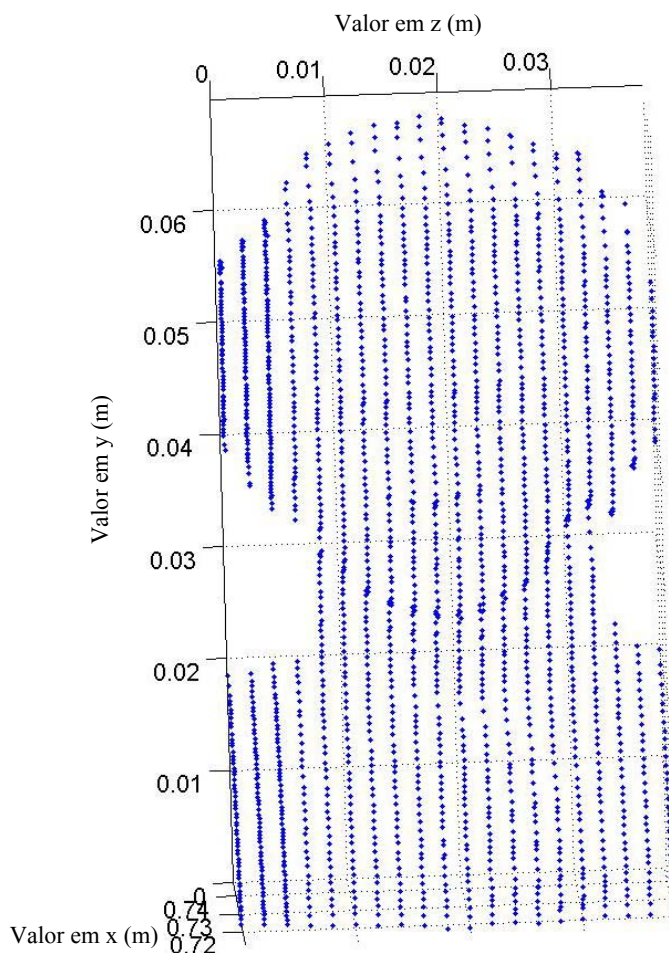


Figura 4.14 – Representação gráfica das várias linhas de perfil adquiridas nos sucessivos varrimentos.

Como se pode observar pela análise da Figura 4.14, através da dispersão dos pontos obtidos é possível visualizar o formato do objecto em estudo. Porém, como o ângulo de visualização do gráfico corresponde ao plano frontal do objecto, os pormenores de relevo do mesmo não são muito perceptíveis. Contudo, visualizando a mesma representação em diferentes ângulos, o relevo do objecto torna-se evidente. Na Figura 4.15 é possível

visualizar a imagem em diferentes ângulos e consequentemente os pormenores do relevo conseguidos no varrimento.

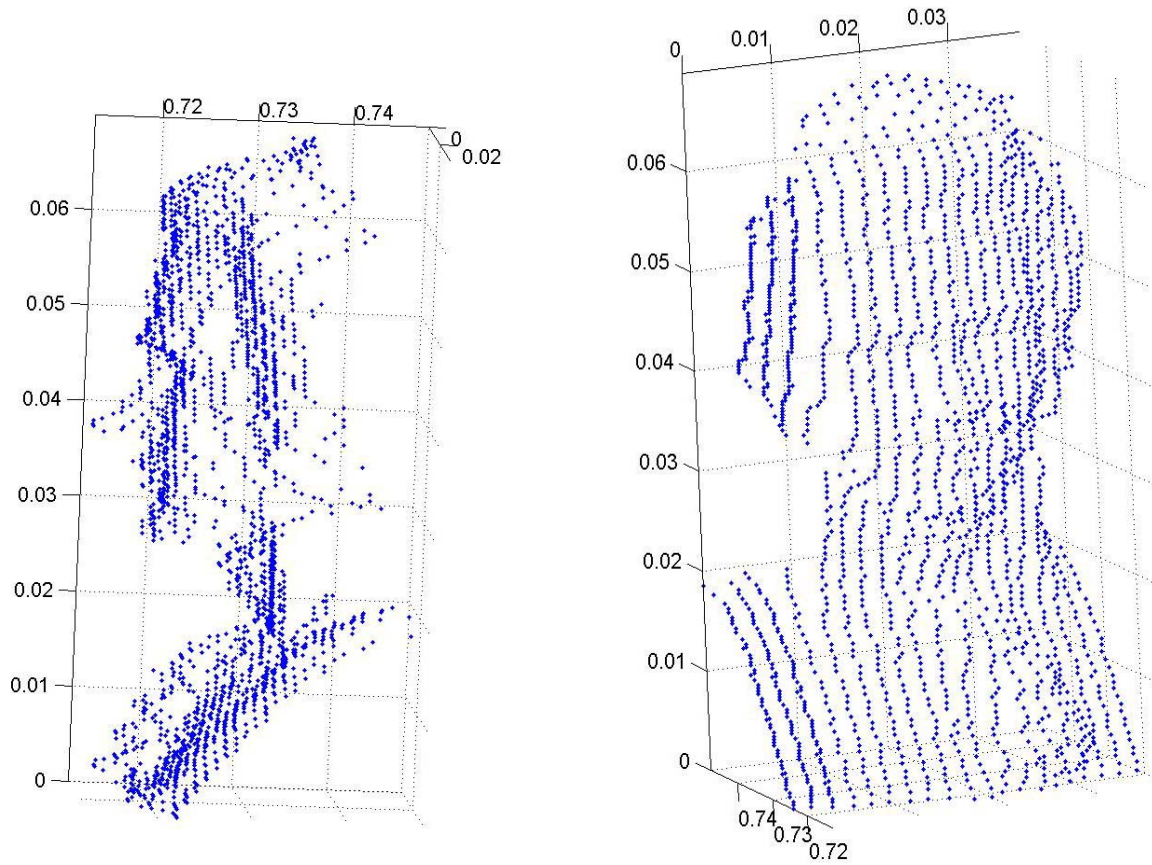


Figura 4.15 – Representação da dispersão dos pontos adquiridos, vista de ângulos diferentes.

Apesar da representação realizada fornecer uma sugestão do relevo do objecto ao qual foi efectuado o varrimento, não é ainda uma representação tridimensional do mesmo. Para conseguir uma imagem virtual, o mais uniforme e semelhante possível ao objecto, é necessário submeter os dados recolhidos a uma interpolação entre pontos, para inferir computacionalmente valores que não foram recolhidos durante o varrimento. A Figura 4.16 representa a reconstituição efectuada.

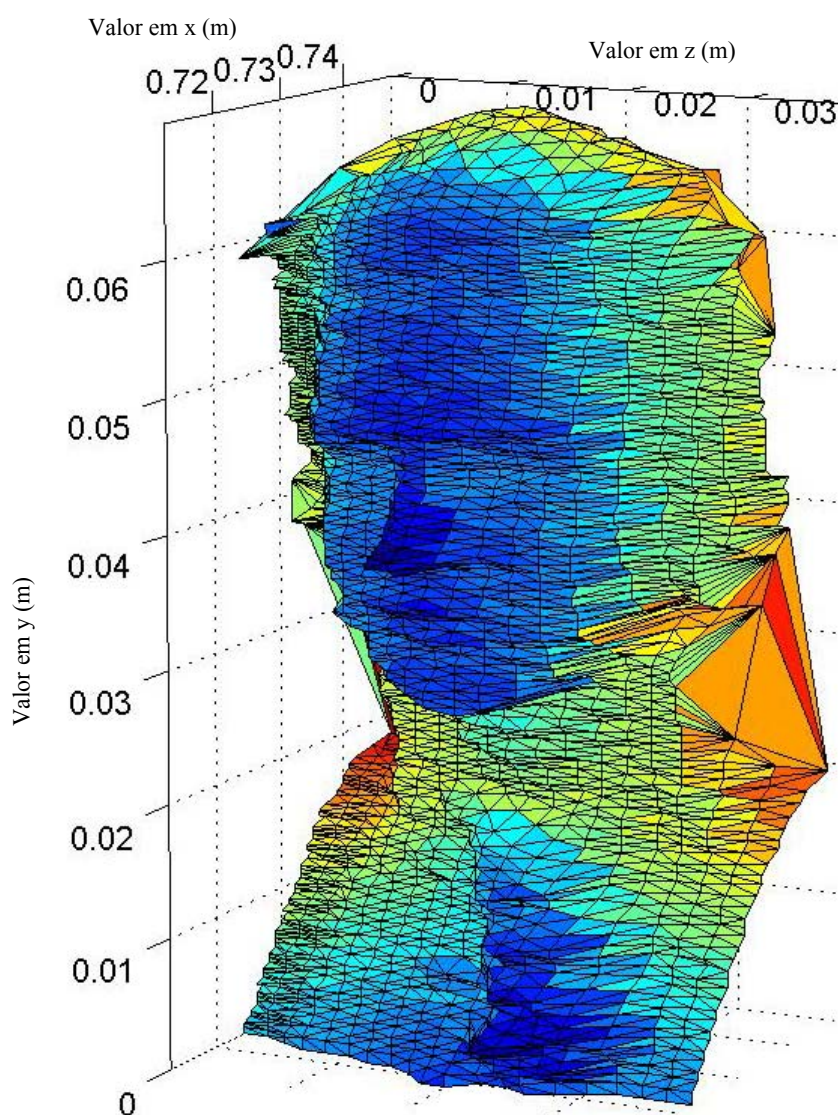


Figura 4.16 – Reconstituição tridimensional da face da estátua.

Para esta representação foram utilizados um total de 2067 de pontos. A diferença relativamente ao valor total de pontos adquiridos (2380), prende-se com o facto de alguns dos pontos serem desprezáveis por se encontrarem afastados dos restantes, ou por não pertencerem à malha relativa à imagem/estátua.

Pela análise da Figura 4.16, e comparando com as fotografias apresentadas anteriormente nas Figuras 4.12 e 4.13, é possível perceber nesta reconstituição tridimensional alguns dos pormenores visíveis na estátua. Com uma visualização de diferentes ângulos, é possível reconhecer diferentes pormenores, imperceptíveis

anteriormente. Assim, a Figura 4.17, corresponde à mesma representação, mas com a visualização de ângulos diferentes.

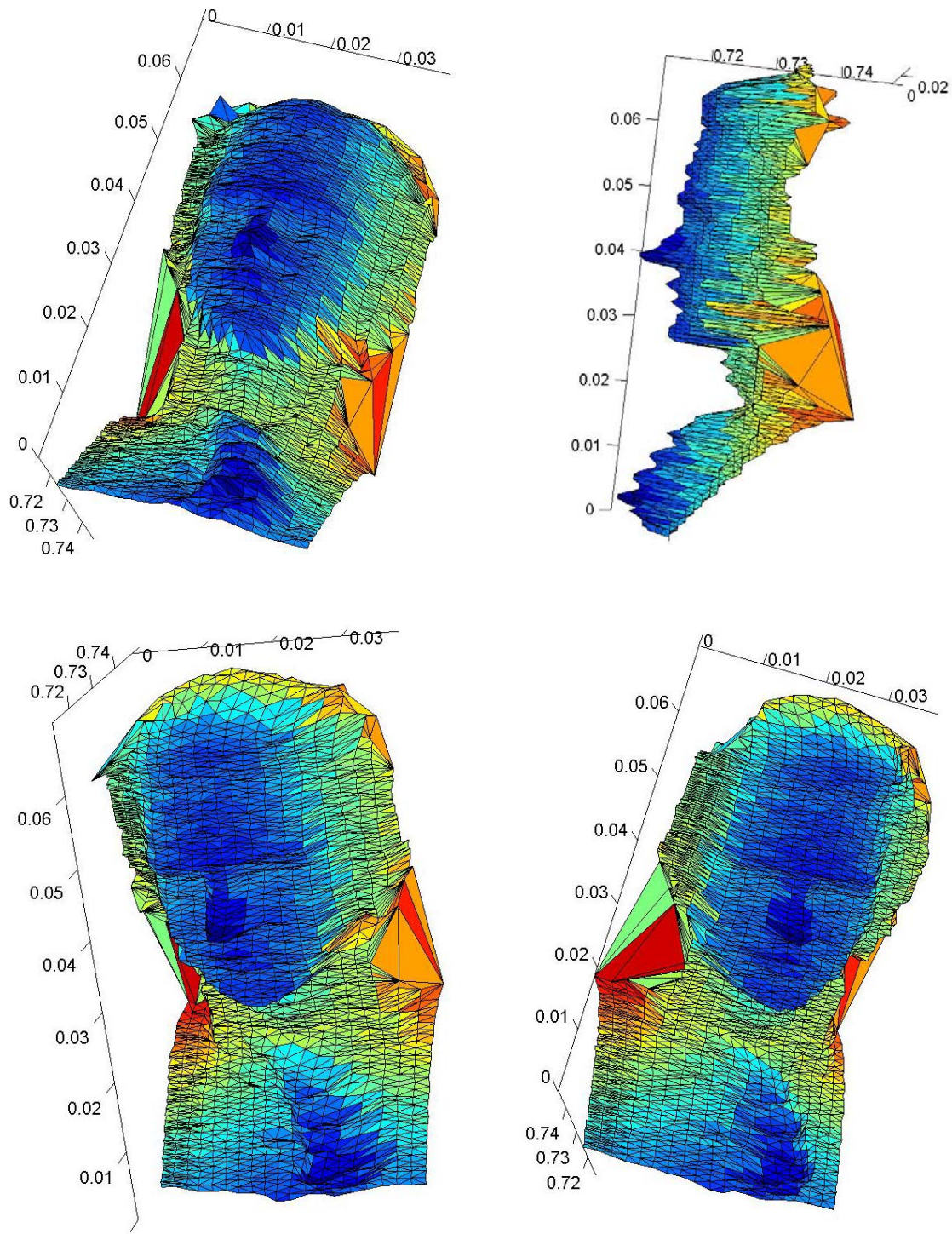


Figura 4.17 – Visualização da reconstituição 3D da face da estátua em diferentes ângulos.

Para a obtenção das representações presentes nas figuras anteriores, assim como também para o tratamento de dados prévio, foi utilizada uma aplicação desenvolvida em *Matlab*. Para a representação tridimensional foi utilizada a função *Delaunay*, presente na *toolbox* do processamento de imagem do *Matlab*. Esta função permite unir em sucessivos triângulos os vários pontos da mesma vizinhança, para em seguida representar toda a superfície formada por eles. Os dados são introduzidos sob a forma de uma matriz $N \times 3$, sendo N o número total de dados adquiridos para cada uma das 3 coordenadas, x , y e z . A função utilizada define e representa um triângulo para cada linha da matriz. Esta ferramenta é útil para criar uma rede triangular a partir de um conjunto de pontos dispersos. [17] A rede triangular gerada para os dados obtidos no varrimento da estátua é visível nas reconstituições apresentadas anteriormente nas Figuras 4.16 e 4.17.

Com o objectivo de obter uma reconstituição da face com formas mais suavizadas, foi utilizada uma outra função do *Matlab*, *Shading Interp*. O resultado obtido está representado na Figura 4.18. [17]

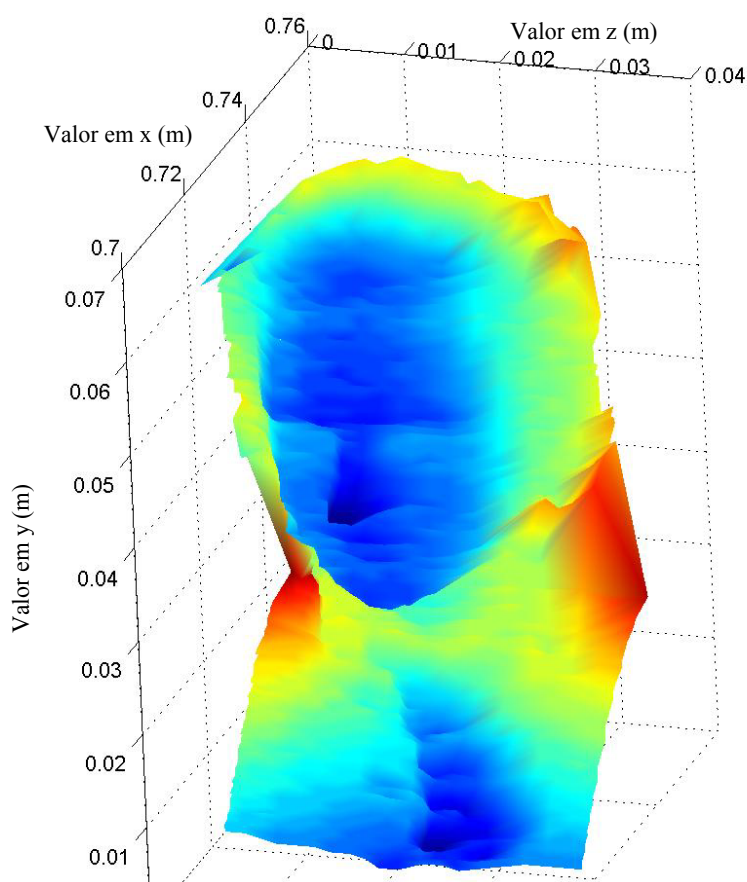


Figura 4.18 – Representação da face da estátua com contornos suavizados.

Esta última função utilizada permite conferir à imagem um gradiente de coloração proporcional aos valores da superfície de relevo. Para que as variações não sejam tão bruscas como as visíveis nas figuras anteriores, esta função permite variar linearmente a cor em cada segmento, e fazer a interpolação para os valores na fronteira entre segmentos.

Com esta representação é possível chegar a uma figura com uma textura uniforme, e obter uma reconstituição da face da estátua, de dimensões relativamente pequenas, com alguma precisão.

Capítulo 5

Conclusões e trabalho futuro

5.1. Conclusão

Neste trabalho foi apresentado um sistema óptico para monitorização desenvolvido com a finalidade de facultar uma adequada monitorização da evolução de deformações em edifícios históricos. Para a sua optimização foi necessário numa primeira etapa sincronizar o sistema de varrimento com o sistema de aquisição de distâncias. Tal objectivo foi conseguido utilizando uma interface computacional que permite controlar simultaneamente, os dois sistemas atrás mencionados. Assim, através da medição laser de distâncias foi possível adquirir dados para a recriação do perfil de estruturas, com resolução na ordem dos milímetros. Verificou-se também que os dados adquiridos pelo

sistema de varrimento podem ser usados para a reconstrução tridimensional de objectos ou da estrutura em análise.

Uma das desvantagens da utilização deste sistema deve-se à morosidade de cada operação de varrimento efectuada. Para que seja estabelecida uma correcta sincronização entre o LRF e a rotação dos espelhos e, assim, sejam adquiridos o número máximo de pontos possível em cada varrimento é necessário que a frequência de varrimento seja muita baixa, da ordem dos 0,001 Hz, o que torna todo o processo de aquisição relativamente lento. Contudo, foi possível adquirir varias linhas de perfil do pilar do Arco - Cruzeiro da Igreja da Misericórdia com desvio padrão em relação à curva média de 0,0018m.

Utilizando o princípio aplicado para a aquisição das linhas de perfil mencionadas anteriormente, foi também efectuado o varrimento a uma secção de uma estátua com as dimensões de 10 cm de altura por 6 cm de largura. Posteriormente, e através de tratamento computacional dos dados recolhidos, foi possível proceder à sua reconstrução tridimensional. Esta apresenta vários detalhes do relevo de pequenas dimensões, do objecto.

A sensibilidade demonstrada por este sistema para pequenos relevos ou movimentos estruturais (na ordem dos mm), o seu carácter não destrutivo e a possibilidade de medida em tempo real, tornam a sua aplicação numa mais-valia para o processo de monitorização. É certo que a sua aplicação isolada numa análise estrutural mais cuidada, pode revelar certas lacunas, nomeadamente a nível de deslocamentos estruturais com dimensões de ordem inferior ao mm. Contudo, não se pode assumir que a utilização de uma única tecnologia possa ser a única solução para a resolução de um determinado problema. Similarmente, o sistema de varrimento projectado não pretende ser a única solução para as situações em que se propõe intervir. Pretende antes, ser mais uma solução, um complemento às soluções já existentes. A sua utilização na monitorização estrutural, revelou permitir não só a detecção de movimentos estruturais, mas também efectuar uma reconstituição virtual da estrutura em análise. Esta reconstrução virtual pode servir vários propósitos, nomeadamente a nível da análise do seu estado de conservação para preservação ou restauro e também a nível da sua divulgação no universo virtual. A sua utilização revela-se assim uma mais-valia na divulgação da preservação, do restauro e do conhecimento do património cultural.

5.2. Trabalho futuro

No estudo efectuado para a aplicação de um sistema de varrimento laser para monitorização estrutural verificou-se que a principal desvantagem da sua utilização se deve essencialmente com a velocidade de aquisição de distâncias, o que influencia directamente a velocidade de varrimento do sistema.

O facto da sensibilidade do LRF utilizado ser da ordem dos milímetros, torna este sistema insensível para movimentos ou relevos de ordem inferior.

De acordo com o acima descrito, o trabalho futuro a ser desenvolvido poderá passar pela optimização de uma sistema laser para medição de distâncias com maior sensibilidade e maior frequência de aquisição.

De realçar também a necessidade de melhorias a nível de processamento de dados para a reconstituição tridimensional, para que a imagem obtida através da mesma seja o mais fiel possível ao objecto original. A implementação de uma mesa rotativa automatizada e sincronizada com o restante sistema de varrimento, para a aquisição de vários perfis do objecto seria também um propósito a considerar.

Referências bibliográficas

- [1] Lourenço, P.B., “Structural Restoration of Monuments: Recommendations and Advances in Research and Practice”, *1st International Conference on Restoration of Heritage Masonry Structures*, April 2006 , Cairo
- [2] Domingues, M.F.F., André, P., Pinto, J.L., “Structure Monitorization with Laser Scanning and Range Finder”, *Proc. PTEE 2007*, October 2007, Delft
- [3] Lourenço, P.B., “Recommendations for Restoration of Ancient Buildings and the Survival of a Masonry Chimney”, *Construction and Building Materials* 20 239–251, (2006)
- [4] Rickstal, F.V., Schueremans L., Beeldens, A., Toumbakari, E. , Ignoul,S., Brosens, K., Balen, K. V., Gemert D. V., “New Technologies for Safeguarding cultural Heritage– A State of the Art of Applied Research and Practice in Belgium ”
- [5] Rede Azul, “Estudo de Novas Tecnologias Aplicadas ao Restauro”, *Projecto Rede Azul*
- [6] Lima, H.F., Vicente, R., Nogueira, R.N., Abe, I., André, P., Fernandes, C., Rodrigues, H., Varum, H., Kalinowski, H.J., Costa, A., Pinto, J.L., “Structural Health Monitoring of the Church of Santa Casa da Misericórdia of Aveiro using FBG sensors”, aceite para publicação na *IEEE Sensors Journal*, 2008.
- [7] Park, H.S., Lee, H.M., Adeli, H., Lee, I., “A New Approach for Health Monitoring of Structures: Terrestrial Laser Scanning”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol.22, 2007

- [8] Godin, G., Beraldin, J.A., Taylor, J., Cournoyer, L., Rioux, M., El-Hakim, S.F., Baribeau, R., Blais, F., Boulanger, P., Domey, J., Picard, M., “Active Optical 3D Imaging for Heritage Applications”, *IEEE Computer Graphics and Applications*, September/October 2004
- [9] Winkelbach, S., Molkenstruck, S., Wahl, F.M., “Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach”, *Springer Berlin Heidelberg*, 2006
- [10] Blais, F., “Review of 20 years of range sensor development”, *Journal of Electronic Imaging*, vol.13 (1), January 2004
- [11] Aman, M.C., Lescure, T.B.M., Myllylä, R., Rioux, M., “Laser Ranging: a Critical Review of Usual Techniques for Distance Measurement”, *Optical Engineering*, vol.40, N°1, January 2001
- [12] Wu, K.R., Yan, A., Liu, J., Zhang, D., Yao, W., “Reconstruction and analysis of 3-D profile of fracture surface of concrete”, *Cement and Concrete Research*, March 2000
- [13] Jain, S., “A Survey of Laser Range Finding”, 2003.
- [14] Baud, C., Tap-Beteille, H., Lescure, M., Beteille, J.P., “Analog and Digital Implementation of an Accurate Phasemeter for Laser Range Finding”, *Sensors and Actuators A132*, 258–264, July 2006
- [15] Hilti Corporation, *Hilti PD38 Laser Range Finder DataSheet*, 2006
- [16] National Instruments Corporation, *USB-6008/6009 User Guide and Specifications*,
- [17] *MATLAB6.5\toolbox\matlab*

Publicações e comunicações resultantes do trabalho efectuado

- Domingues, M.F.F, André, P., Pinto, J.L., “Structure Monitorization with Laser Scanning and Range Finder”, in *Physics Teaching in Engineering Education PTEE 2007*, Delft University of Technology, October 2007, Delft, The Netherlands
- Domingues, M.F.F., Lima, H., André, P., Nogueira, R., Varum, H., Pinto, J.L., “Monitorização Óptica da Evolução de Deformações em Edifícios Históricos”, 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia (CLME 2008); Maputo; Moçambique; Setembro (2008). [Este artigo será apresentado nesta conferência em Setembro de 2008, tendo sido aceite no dia 26 de Abril de 2008.]

STRUCTURE MONITORIZATION WITH LASER SCANNING AND RANGE FINDER

DOMINGUES M.F.F, ANDRÉ P, PINTO J.L.

Physics Department, University of Aveiro

E-mail: fatima.domingues@ua.pt, pandre@av.it.pt, jlp@ua.pt

A laser scanning system was developed using a range finder technique based on phase shifting detection. The scanner experimental setup is based on galvanometric mirrors controlled through a computer with digital interface. The aim is to monitor structural movements in heritage buildings.

The system and the technical content have been used for teaching in physical engineering. Some preliminary results on laser scanning and range finder will be presented and discussed, including measurements based on Bluetooth technology.

Keywords: Laser Range Finder, scan system, heritage monitoring, engineer education.

1 Introduction

In a classical teaching situation, learning has a chronological order, being theoretical concepts introduced in first place, followed by problems and exercise applications. However, in a real situation the problem appears first and only afterwards comes the theoretical study and model. In engineering education, the adoption of such strategy (presenting to students a problem or project situation, as a first step of the learning process), has been recommended as teaching methodology, stimulating critical thought and promoting self-direct learning.^[1]

In this paper it is presented a project development, based in a problem situation regarding the cultural heritage restoration and conservation.

The structural movement of buildings, especially in the older ones, is strongly connected with their general conservation state. The patrimony continuous degradation requires adequate methods for structural monitorization, in order to establish a correct diagnosis and to implement effective recovery and preservation plans.

A field study has been carried out, involving Laser Range Finder (LRF) and Fibre Bragg Grating Sensors (FBGS). This work resulted from the need to monitor structural movements of different scales. Since the LRF has a sensing range of millimeters and the FBGS has sensing range of microns, the two methods combine for a complete analysis of the structure, in order to make an accurate diagnosis.

The use of non contact monitoring for structural movements in heritage buildings is a great advantage, allowing the supervision of the structure and its evolution through time without physical interaction.^[2]

The LRF is an important and reliable method of non contact distance measurements. It was chosen for distance measurements of the scan system projected for structural inspection. Its principle of operation is based on sending a signal to an object and analyzing the reflected or scattered signal.^[3]

2 Laser measurement of distance

There are various methods used for distance laser measurement such as triangulation, pulsed time of flight and phase shift. In the triangulation method, a laser beam is sent to the surface of an object and the laser spot imaged on a CCD camera. The position of the image is directly related to the range and the measurement of distance that can be accomplished. ^{[4][5]}

In the laser pulse time-of-flight, a laser pulse is sent to a given scene. The time taken by the pulse to hit the target, to be reflected and to reach the detector is measured. ^[3]

In the phase shift distance measurement, a laser beam carrying a wave signal with a frequency f , is sent to a target at a distance d . After reflection, the signal is received with a phase shift, $\Delta\phi$. ^{[6][7]} The distance d is determined from the phase-shift existing between the emitted and the received laser signal. Since $2\pi f = (\Delta\phi)/(\tau_d)$, where $\tau_d = 2d/c$ is the time of flight, we may conclude that $d = (c\Delta\phi) / (4\pi f)$. In this case, the precision of the distance measurement depends directly on phase measurement accuracy. ^[7]

Structural movements in heritage buildings can be adequately monitored with laser scanning systems, controlled by PDA with Bluetooth connection. Galvanometric mirrors (controlled by a computer) have been a standard choice as scanning devices.

3 Experimental Setup

The experimental system was projected aiming to be an engineer product resulting from different sub-products that can be explored independently or jointly, in different applications. It was intended to allow the practical exploration of several theoretical issues related to the working principle and the application of the used devices.

The potentialities a laser range finder were explored for the acquisition of distances and the calculation of areas, volumes and perimeters, which the device sends automatically to the PDA, as shown in Fig.1. The software available in this device allows the user to benefit from other functions such as the calculations of relief, angles and complementary distances.

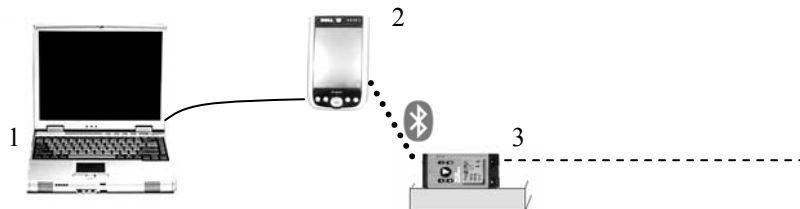


Fig.1 – Hilti PD38 Laser Range Finder, PDA and computer. ^[6]

1- Computer; 2- PDA for laser range finder control; 3- Hilti PD38 Laser Range Finder;

The acquisition and storage of the measured data, is achieved by establishing the connection between Hilti PD38 LRF and PDA, using Bluetooth technology. Each measure can be saved in the PDA excel data sheet, for further analysis. ^[6] During the measurement procedure, it is necessary to ensure the stability of the LRF, in order to guarantee precise, accurate and reproducible distance measurement values.

The use of the LRF in a laboratory experiment was planned in order to acquire several distances values making use of the functions available in the software of the device. Different values of areas, volumes, perimeters, relief of surfaces, were obtained and displayed with an accuracy of $\pm 1.5\text{mm}$.

The use of the LRF for monitoring structural movements was achieved by adding a galvanometer scan system. In this way it was possible to acquire and store distances in a

continuous mode. The experimental setup based on the Hilti PD38 laser range finder and a galvo scan system is shown Fig.2.

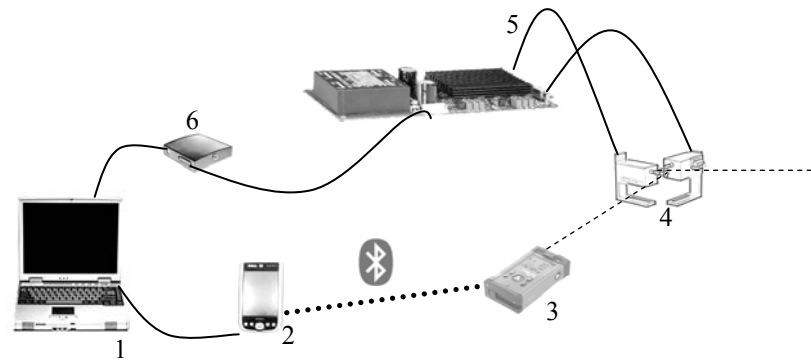


Fig.3 – Experimental Setup for the scanning system.^{[6] [8]}

1- Computer; 2- PDA; 3- Laser Range Finder (Hilti PD38); 4- Galvanometric mirrors; 5- Driver board; 6- USB Box for galvanometric mirrors control.

The global galvo scan system, it is based on two galvanometric mirrors for X and Y scan, as shown in Fig.3, the drive board to control the mirrors movement and the USB box, as interface between the drive board and the computer. Typically, programs as Mamba or Ilda are used to control the galvanometric device and explore all its facilities. This system offers flexibility, speed control and accuracy.^[8]

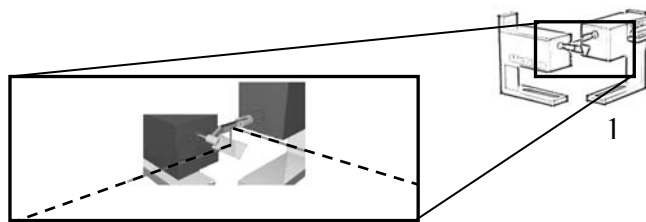


Fig.3 – Galvanometer mirrors.^[8]

Measurements and data acquisitions were controlled through the PDA. With the need to make repetitive and constant measurements along the scan, it is necessary to communicate that repetitive function to Laser Range Finder. To do so, a macro program was used allowing the repetition of the same function as needed.

A pocket PC controller was used to control the PDA from the computer and therefore, control the Laser Range Finder. This condition was imposed by Hilti dedicated software, which doesn't allow the communication between a computer and the laser device.

The galvo mirrors were controlled using a proper program, compatible with the USB box, which allowed the communication of different instructions such as scan velocity and direction.

The control of the parameters mentioned above is important for structural monitoring since it allows acquiring and storing distances for the same coordinates, at different periods of time. In this way it is possible to detect the movement of the structure scanned.

4 Discussion and Conclusions

A laser scanning system was implemented and developed for structural monitorization. Its application for distance measurements in heritage and cultural patrimony was tested and explored as a strategy of project based learning.

A project based on the exploration of the components and techniques referred it seemed extremely adequate for laboratory work in different advanced courses in engineering degrees, namely post-graduate courses on optoelectronics, optical metrology and remote sensing. In addition, it was possible to induce individual and group autonomy, to develop an engineer culture, to establish partnerships with cultural institutions and to stimulate industrial entrepreneurship.

In the near future, other engineering applications are expected to be implemented.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the support of the Physics Department of University of Aveiro.

References

- [1] http://www.samford.edu/ctls/pbl_background.html, September 2007
- [2] S. Yoneyama, Y. Morimoto, M. Fujigaki, Y. Ikeba “Scanning moiré and spatial-offset phase-stepping for surface inspection of structures”, *Optics and Lasers in Engineering*, 43, 659-670, 2005
- [3] S. Jain, “A Survey of Laser Range Finding”, 2003.
- [4] F. Blais, “Review of 20 years of range sensor development”, *Journal of Electronic Imaging*, 13(1), 231-240, 2004.
- [5] K. Wu, A. Yan, J. Liu, D. Zhang, W. Yao, “Reconstruction and analysis of 3-D profile fracture surface of concrete”, *Cement and Concrete Research*, 30, 981-987, 2000.
- [6] www.hilti.com, consulted at September 2007.
- [7] C. Baud, H. Tap-Béteille, M. Lescure, J. P. Béteille, “Analog and digital implementation of an accurate phasemeter for laser range finding”, *Sensors and Actuators*, A 132, 258-264, 2006.
- [8] <http://www.medialas.de>, consulted at September 2007.

Artigo REF: 39A004

MONITORIZAÇÃO ÓPTICA DA EVOLUÇÃO DE DEFORMAÇÕES EM EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

M. Fátima F. Domingues^{1(*)}, Hugo F. T. Lima^{*1}, Paulo S. B. André^{1,2}, Rogério N. Nogueira²,
Humberto S. A. Varum³ e João L. Pinto^{1,2}

¹Universidade de Aveiro, Departamento de Física - Aveiro, Portugal

²Instituto de Telecomunicações - Aveiro, Portugal

³Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil - Aveiro, Portugal

(*)Email: fatima.domingues@ua.pt

RESUMO

As estruturas de património arquitectónico apresentam, pela sua natureza e história, um elevado desafio no campo da conservação. Para vencer esse desafio é indispensável combinar o conhecimento e experiência científico e cultural para o estudo exaustivo das melhores soluções a aplicar, quer no âmbito da análise e diagnóstico, quer no âmbito da intervenção e conservação.

Com o objectivo de facultar meios de análise e diagnóstico adequados ao património arquitectónico, foram desenvolvidos e implementados sistemas ópticos para monitorização estrutural. Um dos sistemas tem por base o uso de sensores de fibra óptica baseados em redes de Bragg. Um outro sistema tem por base a medição laser de distâncias por diferença de fase.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o estudo da evolução de deformações em edifícios históricos tem-se vindo a acentuar, com o objectivo de estabelecer diagnósticos correctos e programar planos de recuperação eficazes. No presente trabalho serão apresentados dois sistemas ópticos implementados e desenvolvidos para monitorização estrutural. Um dos sistemas tem por base o uso de sensores baseados em redes de Bragg em fibra óptica e o outro sistema tem por base a medição laser de distâncias por diferença de fase.

As redes de Bragg em fibra óptica são componentes ópticos caracterizados pela modulação periódica longitudinal do índice de refração do núcleo de uma fibra óptica. Estas estruturas actuam como filtros ópticos, permitindo a passagem de todas as radiações, excepto aquela cujo comprimento de onda satisfaz a condição de Bragg, dada por $\lambda_{Bragg} = 2n\Lambda$, onde n é o índice de refração da fibra, Λ o período de modulação do índice e λ_{Bragg} o comprimento de onda de Bragg [Nogueira, 2005].

A utilização de redes de Bragg como sensores tem-se vindo a acentuar nas mais diversas áreas de engenharia. Com efeito, dado que o comprimento de onda reflectido varia com perturbações externas, tais como variações de temperatura ou tensão mecânica, as redes de Bragg podem ser utilizadas como sensores extremamente precisos, com propriedades relevantes no campo da engenharia civil. Nesta área, podem salientar-se as aplicações na monitorização dinâmica [Antunes, 2007] e estática [Lima et al., 2007] de estruturas e no estudo dos processos de cura de materiais [Lima, Ribeiro et al., 2007].

Relativamente à medição laser de distâncias, o sistema utilizado baseia-se na emissão de um sinal óptico e na posterior análise do sinal reflectido [S. Jain, 2003]. Um feixe laser, modulado com uma determinada frequência, é direccionado para um dado alvo a uma certa distância. O sinal retro reflectido é recebido com uma diferença de fase em relação ao emitido. A distância é determinada a partir dessa diferença de fase. Neste caso, a precisão na medida da distância depende directamente da precisão da medida de fase [C. Baud et al., 2006], [Jain, 2003]. O sistema Laser Range Finder (LRF) utilizado possui um alcance de 200 m e uma precisão de 1,5 mm. O software e a tecnologia disponibilizada possibilitam a sua interface com um PDA, através de comunicação Bluetooth. Deste modo, é possível controlar a aquisição das distâncias e efectuar o armazenamento dos valores adquiridos para posterior análise.

DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

Aplicação de sensores baseados em redes de Bragg para monitorização estrutural

Tendo como objectivo avaliar a estabilidade do Arco-Cruzeiro da Igreja da Santa Casa da Misericórdia de Aveiro, foi desenvolvido um sistema de monitorização estrutural baseado em sensores de Bragg em fibra óptica, com capacidade para monitorizar deformações à escala micrométrica.

Este sistema é composto por 19 sensores de deslocamento e 5 sensores de temperatura, colocados sobre as principais fendas detectadas na avaliação estrutural inicial. A disposição destes sensores encontra-se assinalada na Figura 1, na qual é também possível observar uma linha a vermelho que percorre as fissuras de maior dimensão.

Consoante a fissura que se pretendia monitorizar, os sensores foram instalados em suportes para regiões planas e em suportes para regiões desniveladas, representados esquematicamente na Figura 2. Estes suportes foram fixos à estrutura usando uma resina epoxy, de modo a não danificar a estrutura. Os sensores foram depois unidos formando 5 cabos, que depois se ligam à unidade de interrogação.

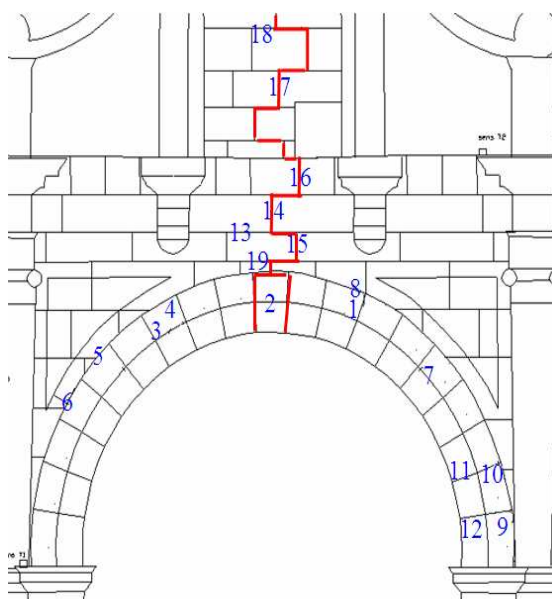


Figura 1. Esquema da disposição dos sensores de Bragg na Igreja da Misericórdia de Aveiro.

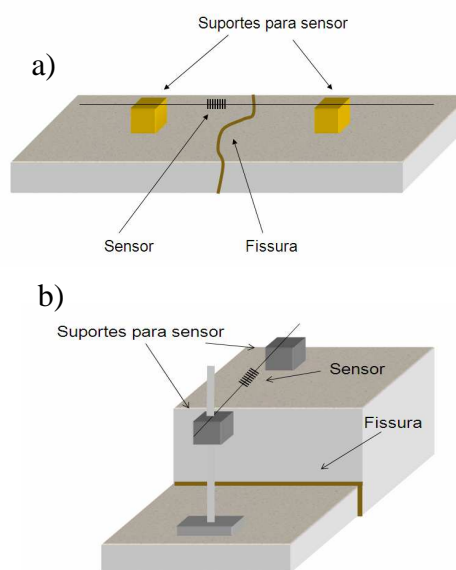


Figura 2. Esquema do suporte do sensor para as regiões planas (a) e desniveladas (b).

Aplicação da medição laser de distâncias para monitorização

Tendo por base o funcionamento de um medidor de distâncias descritas anteriormente, foi projectado um sistema de varrimento para monitorização de estruturas. Neste sistema de varrimento, um feixe laser portador de um sinal é direccionado através de um espelho rotativo para a estrutura/objecto que se pretende analisar. Através do software de interface existente entre o LRF e o PDA, é possível adquirir e armazenar sucessivos valores de distâncias em intervalos de tempo definidos pelo utilizador.

A rotação do espelho, responsável pelo varrimento da estrutura, é controlada através da aplicação de uma sinal triangular, e assim, é também possível controlar a direcção do feixe na estrutura. Conjugando estes dois sistemas (aquisição de distâncias e varrimento), é possível adquirir sucessivos valores de distâncias, do espelho à estrutura.

Para que num varrimento sejam adquiridos um número máximo de pontos possível, é necessário que a velocidade de aquisição de distâncias esteja coordenada com velocidade de varrimento. Esta, é estabelecida pela velocidade de rotação do espelho e é proporcional à tensão que lhe é aplicada.

A partir da relação entre o valor de tensão aplicada e o ângulo de rotação, dada por $\theta = 8,345 \cdot V + \theta_i$, (onde θ_i é ângulo inicial, V é a tensão aplicada e θ é o ângulo do feixe com a horizontal), é possível calcular o ângulo a que cada valor de distância é adquirido, desde que a razão entre a taxa de aquisição e a velocidade de varrimento seja devidamente controlada. Assim, os dados directamente recolhidos através do varrimento, distância ao ponto e respectivo ângulo, correspondem às coordenadas polares de cada ponto da estrutura. Os pontos adquiridos têm como origem de referencial o sistema de varrimento. Através das coordenadas polares, podemos posteriormente calcular as coordenadas cartesianas, que quando representadas graficamente nos fornecem o perfil da estrutura em análise.

RESULTADOS

Sensores de Bragg

A aquisição de dados foi realizada em intervalos de duas semanas. O sistema de interrogação usado em conjunto com os sensores de Bragg, permite uma resolução em deslocamento de 0,2 μm e em temperatura de 0,1°C.

Nos resultados obtidos é possível observar deslocamentos com duas origens distintas: deslocamentos resultantes de fenómenos térmicos, que ocorrerem quando os materiais se expandem/contraem devido a variações de temperatura, e deslocamentos estruturais, resultantes do movimento efectivo entre os pontos de fixação dos sensores. Estes últimos podem ser causados por um vasto conjunto de factores, tais como tensões acumuladas, vibrações resultantes do tráfego automóvel ou sismos.

Na Figura 3 mostram-se alguns dos resultados obtidos, relativamente à variação da temperatura e deslocamento para algumas das fissuras no Arco-Cruzeiro ao longo de um ano de monitorização.

Analisando o gráfico observa-se que existem fissuras que apresentam um comportamento bem correlacionado com a temperatura, como é o caso das fissuras 4 e 5, nas quais não se observam deslocamentos estruturais significativos, permanecendo praticamente com a mesma dimensão do início do estudo. Por outro lado, existem fissuras, como a fissura 2, cuja comportamento não se correlaciona com as variações térmicas, observando-se alguns deslocamentos estruturais, os quais se vão acumulando ao longo do tempo, e que permitem afirmar que esta fissura apresenta uma tendência para fechar.

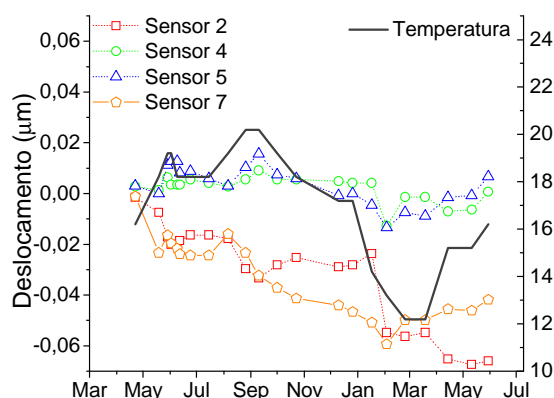


Figura 3. Evolução das temperaturas e deslocamentos entre as duas filas de pedras do arco.

A Figura 4 apresenta os resultados de deformação obtidos para um conjunto de sensores localizados na parte superior do Arco-Cruzeiro. Apesar da existência de pequenos deslocamentos estruturais, o gráfico da Figura 4 mostra essencialmente o efeito que um sismo ocorrido em Fevereiro de 2007, de magnitude 5,9 com epicentro a 500 km da Igreja, provocou na estrutura. Após o sismo verificou-se que as fissuras mais afectadas se situam na região identificada a vermelho na Figura 1, confirmando que esta é a região mais crítica da estrutura. A análise do comportamento das fissuras permitiu inferir o comportamento do arco face ao sismo, o qual se encontra esquematicamente representado na Figura 5.

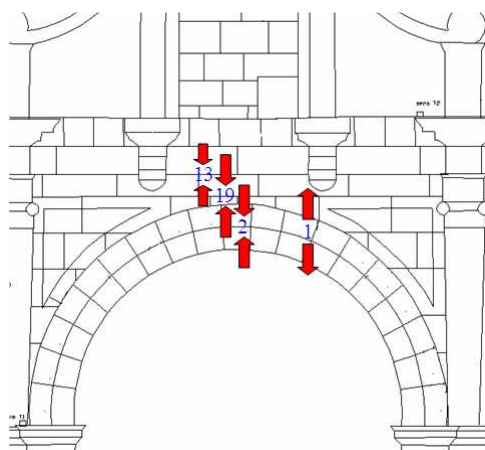


Figura 5. Localização e direcção dos deslocamentos estruturais causados pelo sismo.

Medição laser

Com o propósito de verificar a viabilidade do sistema de varrimento projectado, na monitorização estrutural, foi efectuada uma série de nove varrimentos para uma mesma linha de perfil de uma parede. Estes testes foram realizados no mesmo dia e consecutivamente. Na Figura 6 estão representados graficamente os resultados obtidos para todos os varrimentos efectuados. Na Figura 7 pode-se ver o perfil da parede ao qual foi efectuado o varrimento.

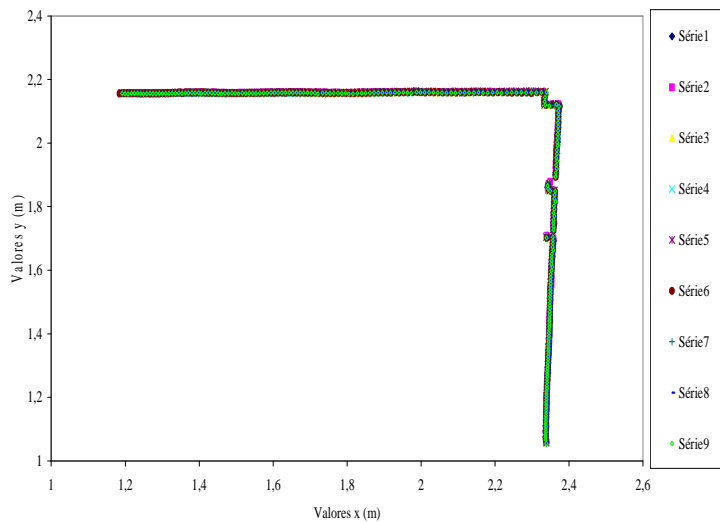


Figura 6: Sobreposição de dados relativos a vários varrimentos efectuados ao mesmo perfil de uma parede.

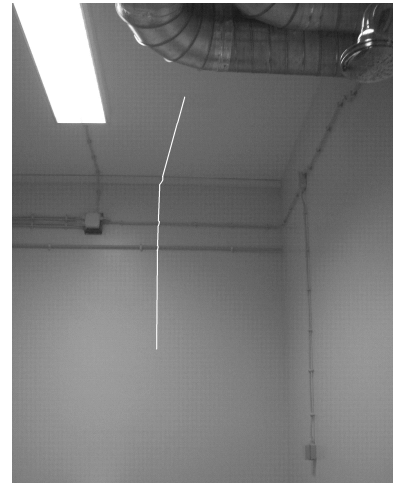


Figura 7: Fotografia da parede e esquema do perfil de varrimento.

Como se pode verificar pela sobreposição das várias linhas de perfil na Figura 6, adquiridas em diferentes varrimentos, os dados obtidos são coincidentes. Esta constatação pode revelar-se de extrema utilidade aquando da sua aplicação na monitorização de estruturas, pois varrimentos efectuados a uma mesma linha de perfil na estrutura, mas realizados com intervalos de tempo considerável (dias, semanas ou meses), permitem inferir o movimento efectuado pela estrutura, caso as linhas para o mesmo perfil não sejam coincidentes.

Este sistema de varrimento foi também testado para a sua eventual utilização na primeira fase da reconstrução 3D de objectos, correspondente à aquisição de dados relativos ao relevo do objecto. A segunda fase será a correspondente ao tratamento computacional dos dados adquiridos. Para esta primeira fase, foram adquiridos sucessivos perfis de uma estátua com um espaçamento de 2mm entre si. As dimensões da estátua são de aproximadamente 6 cm de largura por 10 cm de altura. Na Figura 8 estão representados os dados obtidos no varrimento para um dos perfis. A Figura 9 corresponde à fotografia da estátua em análise, assim como ao

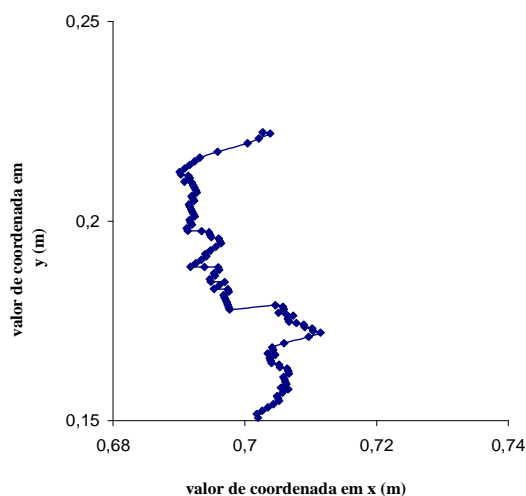


Figura 8: Representação gráfica dos dados de varrimento referentes ao perfil de uma estátua.

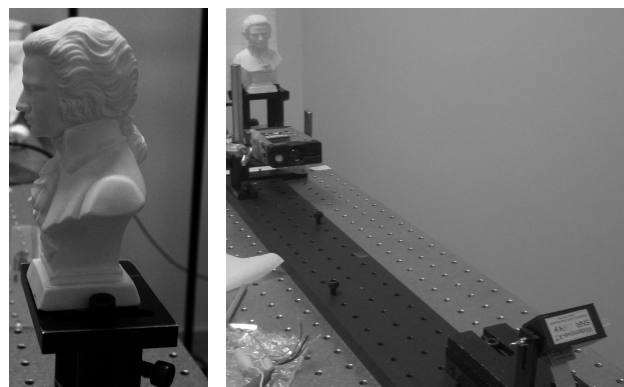


Figura 9: Fotografia da estátua à qual se efectuou o varrimento e sistema experimental.

sistema experimental utilizado. Como se pode verificar pela análise da Figura 8, é possível reconstruir graficamente, através deste método, pormenores de relevo de uma estátua de dimensões relativamente pequenas.

CONCLUSÃO

Os sistemas ópticos apresentados foram desenvolvidos de modo a permitirem uma adequada monitorização da evolução de deformações em edifícios, em diferentes escalas, com vista à implementação das melhores práticas de reabilitação do património histórico e cultural. Como vantagens adicionais, salientam-se a elevada sensibilidade, o carácter não destrutivo e a possibilidade de medida em tempo real. Os dados obtidos possibilitam também a calibração de modelos numéricos existentes, permitindo um estudo mais aprofundado do comportamento estrutural.

Com a implementação de um sistema de monitorização estrutural baseado em redes de Bragg em fibra óptica, foi possível medir deformações à escala micrométrica. Com este sistema foi também possível observar o comportamento das fissuras da estrutura face às variações térmicas e identificar os efeitos de fenómenos oscilatórios na estrutura, tais como o sismo acima mencionado.

Através da medição laser de distâncias é possível adquirir dados para a recriação do perfil de estruturas, com precisão na ordem dos milímetros (precisão associada ao LRF utilizado). Os dados adquiridos pelo sistema de varrimento projectado podem também ser usados para a reconstrução 3D de objectos ou da estrutura em análise.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio recebido do projecto Física em Rede e da Fundação para a Ciência e Tecnologia, através da bolsa SFRH/BD/30295/2006.

REFERÊNCIAS

- Antunes, P., Análise dinâmica de estruturas com sensores de Bragg, Dissertação de Mestrado, Departamento de Física, Universidade de Aveiro, (2007)
- Baud, C. & Tap-Béteille, H. & Lescure, M. & Béteille, J. P., Analog and digital implementation of an accurate phasemeter for laser range finding, *Sensors and Actuators, A* 132 (2006) 258-264.
- Jain, S., A Survey of Laser Range Finding, (2003).
- Lima, H. & Ribeiro, R. et al., Continuous monitoring of setting and hardening of mortar using FBG sensors, *Proc. SPIE*, 6585 (2007) pp. 6585OD.
- Lima, H. et al., Structural health monitoring of the church of Santa Casa da Misericórdia of Aveiro using FBG sensors, *Proc. SPIE* 6619 (2007) 661941.
- Nogueira, R. N., Redes de Bragg em fibra óptica, Tese de Doutoramento, Departamento de Física, Universidade de Aveiro, (2005).